

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Výkonové LED a jejich vlastnosti  
Power LEDs and their properties

2012

Petr Kočíř

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Kočír**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Výkonové LED a jejich vlastnosti  
Power LEDs and their properties

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti výkonových LED.
2. Realizujte měření spektrální propustnosti vybraných vzorků materiálů pro viditelnou oblast spektra při použití výkonových LED jako zdrojů.
3. Experimentálně ověřte změny ve spektrech výkonových LED při opakované teplotní expozici.

Seznam doporučené odborné literatury:

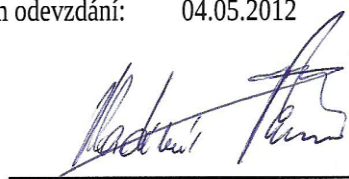
Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

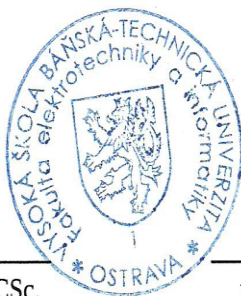
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry

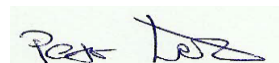


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Dne: 4. 5. 2012



Podpis: .....

## **Poděkování**

„Na tomto místě bych rád poděkoval panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultace při zpracování této bakalářské práce“.

## **Abstrakt**

Začátek bakalářská práce pojednává o klasických LED, ze kterých výkonové LED vycházejí. Téma zahrnuje jejich historii, konstrukci a moderní použití v dnešním světě. Druhá část je věnována hlavnímu tématu, tedy popisu vlastností výkonových LED, která je rozdělena do několika kapitol, které jsou věnovány jejich detailnímu popisu, specifickým vlastnostem a parametrům výkonových LED. Poslední část kapitol je věnována výkonové LED bílé barvy, výhodám, nevýhodám, a kde se všude můžeme setkat s výkonovými LED. V poslední části jsou zobrazeny výsledky praktických měření - spektrální propustnost světla vybraných vzorků materiálů, změna ve spektrech při teplotní expozici. Veškeré tyto informace jsou zpracovány ve formě tabulek a grafů, ze kterých byly učiněny závěry.

## **Klíčová slova**

LED, výkonová LED, řídicí proud, napětí, vlnová délka, propustnost, kyveta, teplota, spektrum, spektrometr, šířka spektra, spektrální charakteristika.

## **Abstract**

Beginning of the bachelor work deals with classic LEDs from which power LEDs come out from. This theme includes their history, structure and application in present days. Second part is attending to main theme of the work, description of power LEDs characteristics, which is splitted to several chapters which are dedicated to detailed description of power LEDs, their special characteristics and parameters. Last chapters discuss white power LEDs, their advantages and disadvantages and there where we could meet with power LEDs in real life too. In last part of the work there are visualizations of results of practical measurements - spectral transmission of light through samples of chosen materials, changes in spectrum while temperature exposing. This information was transferred to charts and schemes from which there were made conclusions.

## **Key words**

LED, power LED, control current, voltage, wavelength, transmission, cell, temperature, spectrum, spectrometer, width of the spectrum, spectral characteristic.

## Seznam zkratek

AlGaAs	hliník arsenidu galia
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
CRI	Color Rendering Index
E <sub>g</sub>	energie zakázaného pásma [V]
f	frekvence [Hz]
GaAs	arsenid galia
GaN	galium nitridu
GaP	fosfid galia
Ge	germanium
I	stejnoseměrný el. proud v propustném směru [mA]
InGaN	nitrid galia a india
InP	fosfid india
R <sub>a</sub>	index podání barev [-]
Si	křemík
SiC	karbid křemíku
T	transmitance [%]
t	teplota [°C]
U	stejnoseměrné el. napětí v propustném směru [V]
$\Delta\lambda$	šířka spektrální charakteristiky [nm]
$\lambda_0$	vlnová pracovní délka [nm]

# Obsah

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2 LED .....</b>	<b>10</b>
2.1 Historie .....	10
2.2 Konstrukční uspořádání .....	10
2.3 Princip .....	11
2.4 Efektivita a funkční parametry .....	12
2.5 Srovnání s vláknovými žárovkami .....	13
2.6 Použití .....	13
<b>3 VÝKONOVÉ LED .....</b>	<b>14</b>
3.1 Popis .....	14
3.2 Konstrukční uspořádání .....	15
3.3 Technologie .....	16
3.4 Specifické vlastnosti .....	16
3.5 Parametry .....	18
3.5.1 Vyzařovací úhel .....	18
3.5.2 CRI = Color Rendering Index .....	19
3.5.3 Svítivost - intenzita světelného záření .....	20
3.5.4 Blikání - přerušovaný režim činnosti .....	21
3.5.5 Teplota chromatičnosti - barevná teplota .....	21
3.5.6 Napájení .....	22
3.5.7 Světelná účinnost .....	22
3.5.8 Účinnost .....	23
3.5.9 Teplotní závislost .....	23
3.5.10 Životnost .....	24

3.6	Výkonová bílá LED .....	24
3.6.1	Generování bílého světelného záření.....	24
3.6.2	Specifické vlastnosti.....	25
3.7	Výhody a nevýhody .....	26
3.8	Použití .....	27
<b>4</b>	<b>REALIZACE PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ .....</b>	<b>29</b>
4.1	Spektrometr USB650 Red Lite .....	29
4.1.1	Princip činnosti.....	30
4.1.2	SpectralSuite.....	31
4.2	Univerzální držák kyvet s krytkou .....	33
4.3	Propojovací optický kabel (patchcord).....	32
4.4	Spektrální propustnost vybraných vzorků materiálů.....	34
4.4.1	Schéma zapojení č. 1 .....	34
4.4.2	Postup měření č. 1 .....	35
4.4.3	Tabulky a grafické zpracování .....	36
4.5	Změna ve spektrech při teplotní expozici.....	38
4.5.1	Schéma zapojení č. 2 .....	38
4.5.2	Postup měření č. 2 .....	39
4.5.3	Tabulky a grafické zpracování .....	39
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>48</b>



# 1 ÚVOD

Pro svoji bakalářskou práci jsem si vybral téma „Výkonové LED a jejich vlastnosti“, kde hlavním úkolem bylo realizovat měření spektrální propustnosti vybraných vzorků materiálů pro viditelnou oblast spektra při použití výkonových LED jako zdrojů a dále ověřit změny v těchto spektrech výkonových LED při opakované teplotní expozici.

Začátek bakalářské práce je věnován klasickým LED, ze kterých výkonové LED vycházejí. Téma se skládá z krátkých šesti kapitol, které zahrnují části od jejich historie, konstrukce, až k jejich modernímu použití v dnešním moderním světě.

Druhá část je věnována hlavnímu tématu, tedy popisu vlastností výkonových LED, které je rozděleno do několika kapitol a podkapitol, kde první kapitoly jsou věnovány jejich detailnímu popisu, konstrukci a specifickým vlastnostem výkonových LED. Druhou část tvoří rozsáhlejší kapitola zabývající se jejich parametry, kde jsou tyto pojmy nejen objasněny, ale jsou zde také uvedeny hodnoty parametrů, které jsou typické pro výkonové LED. V neposlední řadě je zde popsán nejmladší a nejmodernější typ výkonových LED bílé barvy, kde se dozvíme o tom, jak tato barva vzniká a její některé specifické vlastnosti. Poslední kapitoly jsou věnovány výhodám a nevýhodám, ale také tomu, kde se můžeme setkat s výkonovými LED.

Poslední část bakalářské práce je věnována praktické části, kde zdrojem světla byla použita bílá a modrá výkonová LED. Nejprve jsou uvedeny naměřené hodnoty a spektrální charakteristiky propustnosti vybraných vzorků materiálů a nakonec informace o změnách ve spektrech při opakované teplotní expozici. Veškeré tyto informace jsou zpracovány ve formě tabulek a grafů (spektrální charakteristiky) ze kterých byly učiněny závěry.

## 2 LED

V současné době je ve světě tendence nahrazovat klasické světelné zdroje (žárovky, zářivky atd.) polovodičovými elektroluminiscenčními diodami „LED“ (Light Emitting Diode = dioda emitující světlo). Je to elektronická polovodičová součástka obsahující PN přechod. Na rozdíl od klasických diod vyzařuje viditelné světlo, infračervené popřípadě ultrafialové, které je zobrazeno v úzkém spektru barev s velmi vysokým jasnem.

### 2.1 Historie

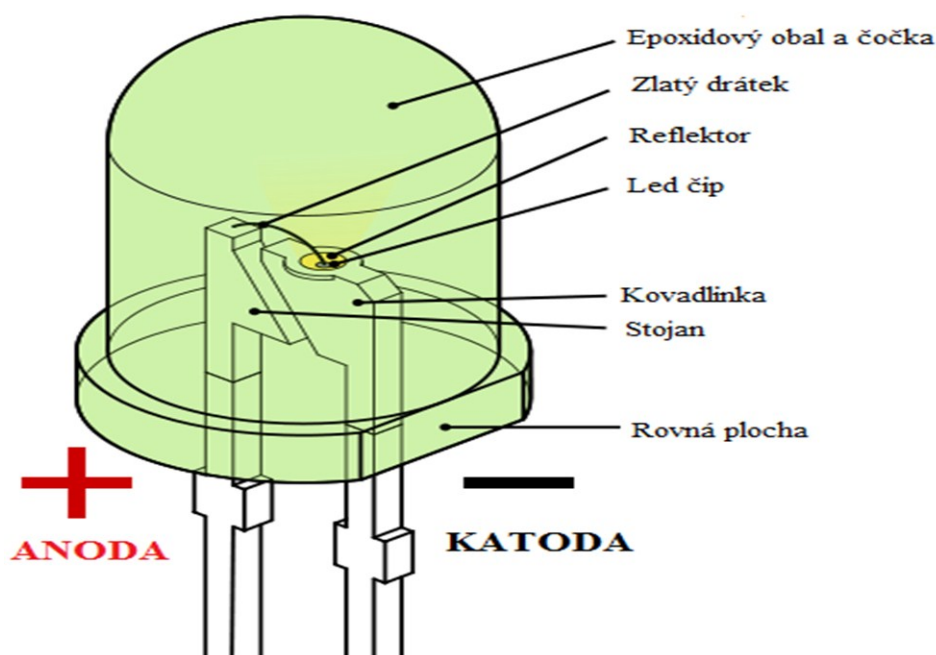
První známá zpráva o diodě emitující světlo byla v roce 1907 a postaral se o to anglický vědec H. J. Round. Nezávisle na tomto vědeckém objevu, ruský vědec O. V. Losev zjistil, že prvek SiC je detektorem světla, nicméně nebylo žádné praktické využití tohoto objevu po několik desetiletí. První prakticky použitelné viditelné červené spektrum LED přišlo až v roce 1962 a objevitelem byl americký vědec N. Holonyak, Jr., který je také držitelem celkem 41 patentů z různých částí fyziky. Zlomovým rokem byl rok 1972, který přinesl nové barvy LED, což umožnilo širší použití těchto zdrojů jako signalizátorů různých stavů zařízení. Posledním objevem byla LED emitující bílé světlo, která se objevila na trhu v roce 1993 a byla tvořena barevným spektrem RGB. O 2 roky později se podařilo vyvinout tuto LED bez použití barevného spektra, jednalo se o bílou LED s jedním čipem s využitím tzv. luminoforu (látky schopná uchovat dodávanou energii a následně vyzářit ve formě fotonů - světlo). Tento typ LED využívá modrou, nebo ultrafialovou LED s luminoforem, který je umístěn v průsvitném pouzdře LED.

### 2.2 Konstrukční uspořádání

Svítivé diody jsou standardně vyráběny ve dvou základních provedeních, klasickém (obrázek 2.2) a SMD. Pouzdro pro klasickou montáž je zpravidla provedeno z průhledného plastu určité barvy, které může být buď čiré, nebo difúzní.

Sestavy více svítivých diod mohou mít samostatně vyveden každý čip, společnou anodu či katodu nebo jiný systém kontaktování dle zamýšleného užití v praktickém použití.

Pouzdro může mít buď kruhový, nebo obdélníkový průřez. Průměr kruhového pouzdra pro klasickou montáž se vyskytuje v rozměrech od 1 do 8 mm, 10 a 20 mm, běžně používaná pouzdra mají rozměry 3 x 5 mm. Typický rozměr obdélníkového pouzdra je 2 x 5 mm.

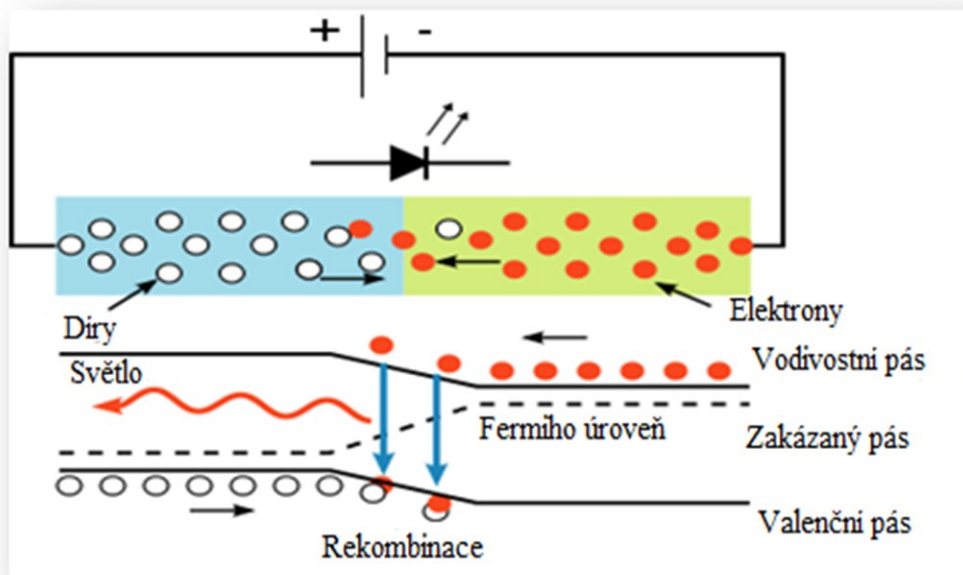


Obr. 2.2 Klasické uspořádání LED.

## 2.3 Princip

Svítivé diody jsou založeny na principu elektroluminiscence (obrázek 2.3) polovodičových materiálů obsahující PN přechod, na kterém vzniká světlo v důsledku přeskoků elektronů z vyšších energetických pásů do nižších. Přiložením stejnosměrného napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Při přechodu elektrických nábojů přes PN přechod dochází k rekombinaci elektronů s děrami. Rozdíl energie mezi dnem vodivostního a vrchem valenčního pásu pak odpovídá energii vyzářené ve formě fotonů (světlo). K tomuto jevu obecně dochází u všech diod, ale pouze v některých případech dojde ke vzniku světelného záření, jinak se elektrická energie mění na fonony (teplo) nebo naopak vzniká neviditelné ultrafialové záření. Vlnová délka vzniklého záření je nepřímo úměrná vyzářené energii, která odpovídá šířce zakázaného pásu.

U svítivých diod se můžeme setkat se dvěma typy PN přechodu. Jedná se o homogenní PN přechod (vytvořen z jednoho typu materiálu - GaAs) a heterogenní PN přechod (vytvořen ze dvou různých materiálů - GaAs a AlGaAs).



*Obr. 2.3 Princip injekční elektroluminiscence.*

## 2.4 Efektivita a funkční parametry

Klasické svítivé diody jsou konstruovány na jmenovitý výkon (příkon) v rozmezí hodnot od 30 do 60 mW. Řídící stejnosměrné proudy se pohybují řádově v desítkách miliampér. Jejich největší výhodou svítivých diod je vysoká efektivita osvětlení (světelná účinnost), což je množství světla (lumenů), které LED vyzáří na 1 watt elektrického příkonu. „Vysoce“ svítivé diody v sériové produkci dosahují hodnoty blíží se k 70 lm/W, v laboratorních podmínkách se však můžeme setkat s „vysoce“ svítivými diodami, jejichž hodnota dosahuje až 150 lm/W. Pro srovnání běžné wolframové vláknové 60 W žárovky dosahují hodnoty okolo 15 lm/W a fluorescenční zářivky 100 lm/W. Velkým nedostatkem je, že efektivita osvětlení výrazně klesá s narůstajícím protékajícím proudem, protože zbytek energie, který není vyzářen ve formě fotonů (světlo) je převeden na tzv. fonony (teplo), a tím dochází k zahřívání a tedy degradaci optických vlastností svítivé diody.

## 2.5 Srovnání s vláknovými žárovkami

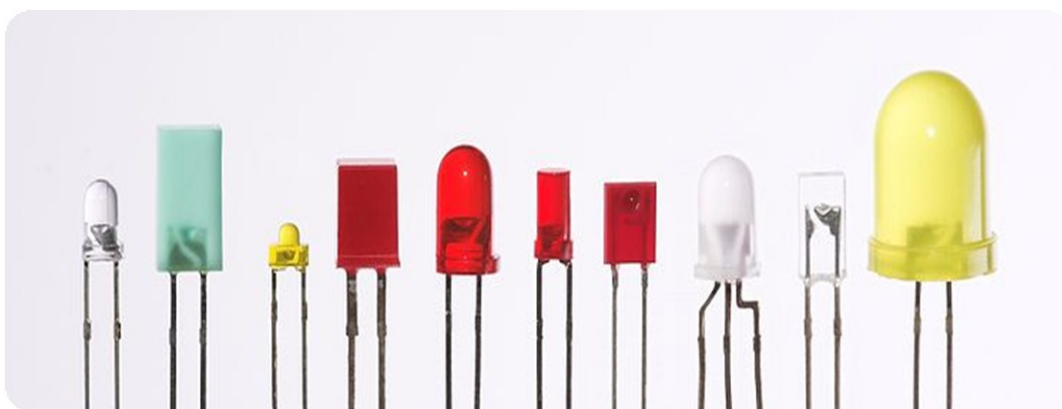
- menší spotřeba, menší generace tepla, větší spolehlivost, extrémně dlouhá životnost, vyšší účinnost;
- poskytují v určitých aplikacích ekvivalentní, případně i lepší osvětlení;
- mechanicky velice malé, a proto mohou být snadno osazeny do desek plošných spojů;
- odolné vůči „blikání“ (přerušovaný režim činnosti);
- umožňují „funkci stmívání“;
- neobsahují žádné toxické ani pohyblivé části;

## 2.6 Použití

Oblast použití svítivých diod se neustále rozšiřuje. Jsou používány v displejích, pro indikace stavů v technologických linkách, jako zdroje světelného signálu pro optická vlákna atd.

Vlastnosti „vysoce“ svítivých diod umožňují jejich použití v osvětlovací technice. V současné době jsou používány např. k osvětlování dopravních značek, k výrobě dopravních světel pro řízení dopravy na křižovatkách, v brzdových světlech automobilů apod. V některých aplikacích svítivé diody úspěšně konkurují klasickým vláknovým wolframovým žárovkám.

Svítivé diody jsou často využívány i pro systémy strojového snímání, které vyžadují jasné a homogenní osvětlení, aby lépe vykonávaly požadovanou činnost. Na tomto poli zůstává jeden z jejich hlavních způsobů využití, dokud jejich cena neklesne natolik, aby byly využity v širším měřítku i v jiných oblastech.



*Obr. 2.6 Ukázky tvarů různých LED.*

### 3 VÝKONOVÉ LED

Díky rychlému vývoji technologií v oblasti LED se dnes stále častěji lze setkat se světelným zdrojem postaveným na bázi power LEDs neboli výkonových LED diodách. První výkonovou LED objevil v roce 1976 T. P. Pearsall.

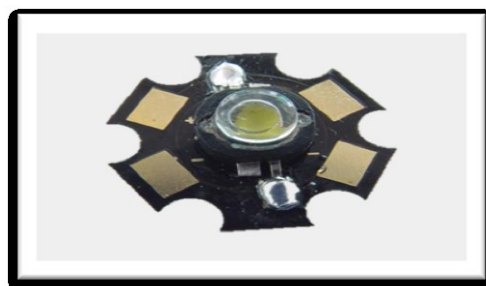
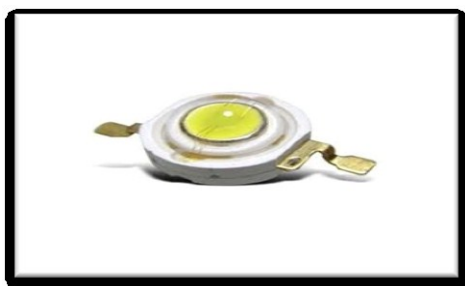
Výkonová LED je dvouelektrodová polovodičová součástka, která se chová jako jednocestný ventil. Jedná se o elektronickou součástku, která na základě fyzikálního jevu tzv. injekční elektroluminiscence vyzařuje monochromatické nekoherentní světelné záření.

#### 3.1 Popis

Za výkonovou LED můžeme považovat svítivou diodu, jejíž hodnota jmenovitého výkonu (příkonu) se pohybuje v rozmezí hodnot od 0,5 do 5 W, popřípadě se blíží, až hodnotě 10 W. V laboratorních podmínkách se však můžeme setkat s výkonovými LED, kdy jejich hodnota příkonu dosahuje až 100 W, dokáží tedy vyzařit světlo až o 7 000 lm. Výkonovými LED protékají mnohonásobně větší proudy než klasickými svítivými diodami, hodnota proudu se pohybuje řádově od stovek mA až k hodnotě 1 A.

Jejich hlavní předností je tedy vysoký příkon soustředěný na malé ploše, takže skládáním těchto výkonových LED do různých tvarů (pásky, kolečka, čtverce atd.) lze v osvětlování dosáhnout velmi dobrých výsledků. Výkonové LED však při provozu generují poměrně dost tepla a tak musí být správně chlazeny, aby nedošlo k jejímu zničení. Proto jsou často jejich součástí hliníkové plošky, zvané chladiče, které odvádějí teplo na opačnou stranu, než svítí „světelný kužel“. Pro instalaci systémů z výkonových LED má vhodný způsob odvodu tepla zásadní význam, jelikož provozní teplota, ve výrobcem uváděné toleranci, má přímý vliv na deklarovanou životnost čipu výkonové LED. Tedy bez použití chladiče (popřípadě i tzv. teplo vodivé pasty) by výkonová LED při provozu během několika málo sekund shořela.

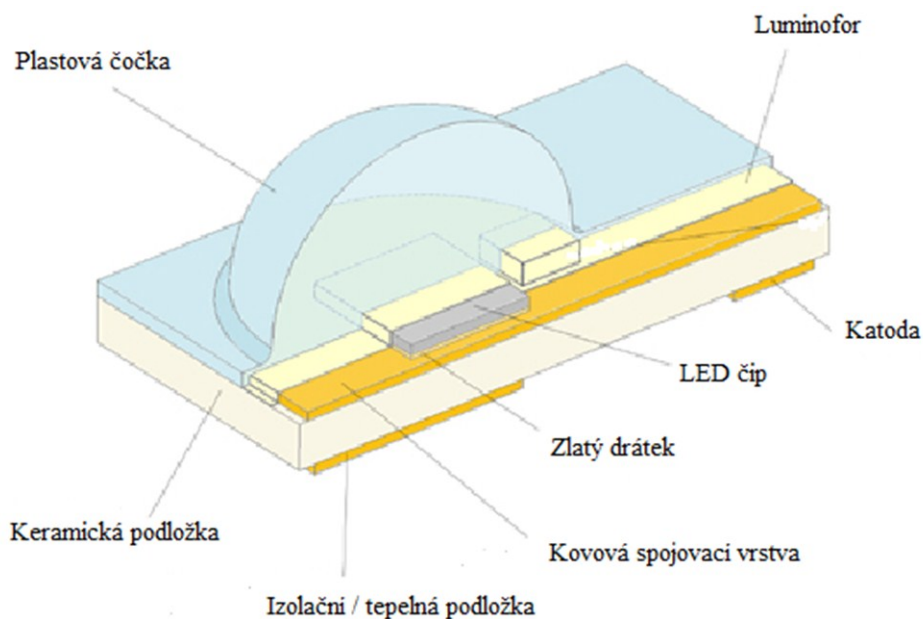
Svítidla s „vysoce“ výkonovými LED jsou schopna poskytnout dostatek světla prakticky kdekoliv. Využívají se zvláště k osvětlení pracovních desek, nasvícení objektů, či stěn v interiéru i exteriéru, osvětlení výloh a výstavních prostorů, ale i k veřejnému osvětlení.



*Obr. 3.1 Výkonová LED bez chladiče (vlevo) a s chladičem (vpravo).*

### 3.2 Konstrukční uspořádání

Hlavní částí výkonové LED je aktivní část tvořena tzv. nanometrickými heterostrukturami (vytvářející tzv. super mřížku), které jsou tvořeny z chemické sloučeniny InGaN. Základem čipu výkonové LED se nejčastěji používá safír ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), SiC, anebo Si. Z důvodu větších protékajících proudů by měla být výkonová LED opatřena chladičem vyrobeným např. z hliníku pro chlazení čipu výkonové LED (odvod tepla).



*Obr. 3.2 Řez výkonovou LED.*

### 3.3 Technologie

Při použití vhodné technologie na zpracování sloučenin InGaN přestala být problematická výroba svítivých diod. Tyto svítivé diody vyzařují velmi intenzivní monochromatické světelné záření (označované jako elektromagnetické záření), jehož zdroj kmitá pouze na jediné frekvenci. Monochromatické proto, že může vyzařovat pouze jednu barvu jako např. modrou, zelenou či ultrafialovou barvu, což bylo v dřívějších dobách prakticky nemožné. Dříve byly „nízko“ výkonové LED vyráběny technologií založenou na zpracování SiC. Tato sloučenina je složitěji technologicky zpracovatelná, protože se navíc jedná o tzv. nepřímý polovodič, ze kterého se světelné záření „získává“ poměrně obtížně.

Mezi výhody při použití technologií na zpracování sloučenin GaN patří zejména hodnota přípustné pracovní teploty čipu, vysoká celková účinnost, vysoký výkon atd.

### 3.4 Specifické vlastnosti

Díky některým specifickým vlastnostem polovodičových prvků (např. energie zakázaného pásu - tabulka 3.4) jsou tyto prvky schopny emitovat velmi intenzivní viditelné záření kratších vlnových délek, než které bylo možné vyzářit svítivými diodami vyrobenými dřívějšími technologiemi.

Polovodičový prvek	$E_g$ [V]
Ge	0,67
Si	1,12
InP	1,27
GaP	2,26
GaN	3

Tab. 3.4 Energie zakázaného pásu u polovodičových prvků.



Mezi typickou vlastnost moderních výkonových LED patří zejména relativně vysoká hodnota úbytku napětí. V závislosti na provozních podmínkách ve výrobní toleranci součástky se pohybuje v rozmezí hodnot od 2,5 do 4 V. Tato výkonová LED musí být zapojena v propustném směru, aby došlo k vyzařování fotonů (světlo).

K průrazu PN přechodu výkonových LED dojde i při relativně nízkém napětí (přibližně větším než 5 V) přiloženém na svorky výkonové LED, jejíž PN přechod je polarizován v závěrném směru. Proto většina výrobců výkonových LED (např. Osram, Philips, Avago...) chrání své produkty proti nesprávné polarizaci napájecího napětí tak, že do pouzdra společně s výkonovou LED integruje i „nevýkonovou“ LED, která je k této výkonové LED zapojena sériově (anti-paralelně). Tahle „ochranná“ LED se rozsvítí v případě nesprávné polarizaci napájecího napětí pro výkonovou LED.

Důvod, proč by neměla být zapojena výkonová LED v závěrném směru napětí, je skutečnost, že v tomto směru napájecího napětí dochází k prudkému nárůstu poruch krystalové struktury čipu výkonové LED. Narušení krystalové struktury obvykle vede v nejlepším případě „pouze“ k degradaci optických vlastností výkonové LED.

Na rozdíl od vláknových wolframových žárovek obvykle degradují velmi pomalu ve smyslu poklesu intenzity emitovaného záření. V dnešní době není stále znám bezpečný, ani spolehlivý způsob, jak u těchto výkonových LED zjistit rozsah degradace jejich optických vlastností. Tyto degradace mohou způsobit, že se v čipu výkonové LED změní rekombinační proces na nezářivé rekombinace elektronů a děr.



*Obr. 3.4 Srovnání výkonových LED (zleva výkonová LED od firmy Osram, Philips a Avago).*

### 3.5 Parametry

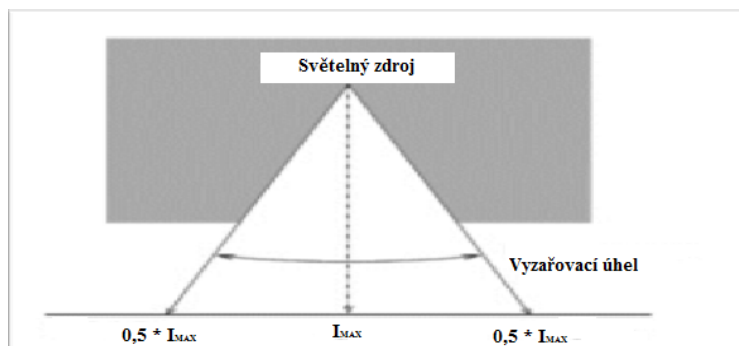
Pro dosažení výborné spolehlivosti a získání záruky dlouhé životnosti, je vhodné pro aplikaci výkonových LED uvažovat o výkonových LED od renomovaných světových výrobců. Podle těchto parametrů (některé obsaženy v katalogu výrobce) si správně vybíráme určitou výkonovou LED pro naši aplikaci.

**Mezi nejdůležitější parametry specifické pro výkonové LED patří:**

- vyzařovací úhel;
- CRI = Color Rendering Index;
- svítivost - intenzita světelného záření;
- blikání - přerušovaný režim činnosti;
- teplota chromatičnosti - barevná teplota;
- napájení;
- světelná účinnost;
- účinnost;
- teplotní závislost;
- životnost;

#### 3.5.1 Vyzařovací úhel

Vyzařovací úhel výkonové LED vyjadřuje rozptyl vyzařeného výkonu od optické osy výkonové LED. Vyzařovací úhel výkonové LED se pohybuje v rozsahu 15 - 180°, ale typická hodnota vyzařovacího úhlu u výkonových LED se pohybuje od hranice 90° až k hodnotám převyšujícím hodnotu 140°.



*Obr.3.5.1 Ukázka vyzařovacího úhlu.*

Typickou hodnotu vyzařovacího úhlu většina výrobců udává při poklesu intenzity emitovaného světla LED na 50 % hodnoty maximální intenzity záření. Vyzařovací úhel světla je tedy více než dostatečný pro použití výkonových LED v řadě běžných aplikací. Vyzařovací úhel můžeme ovlivnit velikostí zrcátka odrazu či čočky, ale také rozměry a umístěním LED čipu.

### 3.5.2 CRI = Color Rendering Index

CRI (Color Rendering Index = index podání barev) je hodnocení věrnosti barevného vjemu, který vznikne osvětlením z nějakého zdroje, v porovnání s tím, jaký barevný vjem by vznikl ve světle slunce.

Pro vyjádření parametru indexu podání barev slouží hodnota  $R_a$ , která se pohybuje v rozmezí hodnot od 0 do 100. Hodnota  $R_a = 0$  znamená, že při tomto osvětlení není možno rozeznat barvy. Naproti tomu hodnota  $R_a = 100$  vyjadřuje, že se jedná o „vysoce“ kvalitní světelný zdroj, který umožňuje přirozené podání barev. Pokud je hodnota  $R_a > 40$ , tak můžeme považovat tuto hodnotu za „vyhovující“. V případě, že hodnota  $R_a > 70$ , můžeme tento světelný zdroj označit jako „průměrně“ kvalitní zdroj světla.

U vláknové wolframové žárovky je tato hodnota  $R_a = 95$ , zářivek je hodnota  $R_a = 80$  (hodnota indexu podání barev je součástí typového označení) a naopak u sodíkové nízkotlakové výbojky je hodnota  $R_a = 0$ . U bílých výkonových LED (YAG) je obvykle hodnota  $R_a > 80$ .



*Obr. 3.5.2 Ukázka dvou různých zdrojů světla.*

Při zkoumání různých zdrojů světla uvidíme, že možnost podání barev (CRI a odpovídající hodnoty) se velmi liší od zdroje ke zdroji (obrázek 3.5.2). Tento parametr CRI má i obrovský význam pro návrháře. Vzhledem k tomu, že návrháři jsou zodpovědní za výrobu mnoha druhů materiálů a barevné provedení, tak si musí také být vědomi nedostatku světelného zdroje. Někdy jsou pak návrháři překvapeni, že dva materiály, které jsou stejné barvy podle konkrétního světelného zdroje, jsou rozdílné za denního světla.

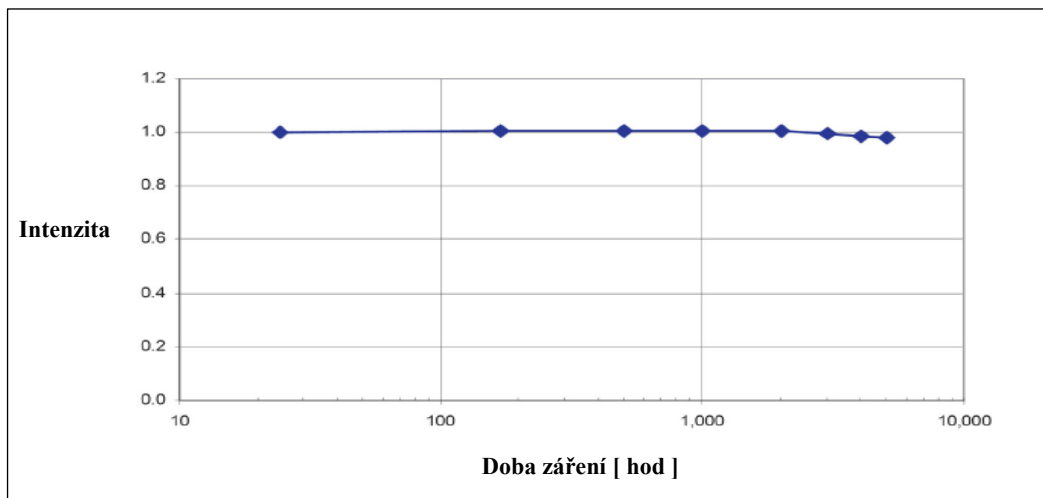
### 3.5.3 Svítivost - intenzita světelného záření

Jednou a nejjistější možností jak okamžitě změnit svítivost výkonové LED představuje použití elektrického napájecího zdroje proudu s plynulou regulací, který umožňuje volit el. proud, jenž protéká výkonovou LED v propustném směru. Tento způsob řízení intenzity světelného záření emitovaného výkonovou LED však vykazuje silně nelineární závislost mezi proudem protékající výkonovou LED a intenzitou emitovaného světla.

Vhodnějším řešením z hlediska linearit regulace svítivosti výkonové LED spočívá v užití takového zapojení, kde propustně polarizovanou výkonovou LED neprotéká el. proud trvale, ale je buzena krátkými obdélníkovými proudovými impulzy s definovaným činitelem plnění a konstantní amplitudou. Frekvence těchto impulzů je natolik vysoká (řádově desítek kHz), že kvůli setrvačnosti lidského zraku není možné tyto jednotlivé impulzy od sebe odlišit. Toto řešení je velmi vhodné zejména z hlediska plynulého „stmívání“ výkonové LED.

V dnešní době vyráběné integrované obvody DC / DC impulzních měničů s proudovým výstupem určené k napájení výkonových LED, jsou vybaveny speciálním vstupem umožňující plynulé „stmívání“ výkonových LED nebo lze jednoduchou modifikací zapojení obvodu měnič k tomuto procesu upravit.

Na obrázku 3.5.3 si můžete prohlédnout relativní pokles intenzity záření vyzařovaného výkonovou LED modré barvy trvale protékajícím proudem 700 mA, při teplotě okolí 85 °C a při teplotě LED čipu rovno 110 °C. Za těchto podmínek by intenzita světelného záření výkonové LED nepatrně poklesla až u hodnoty doby záření rovno 6 000 hodin.



Obr. 3.5.3 Relativní pokles intenzity záření vyzářeného výkonovou modrou LED.

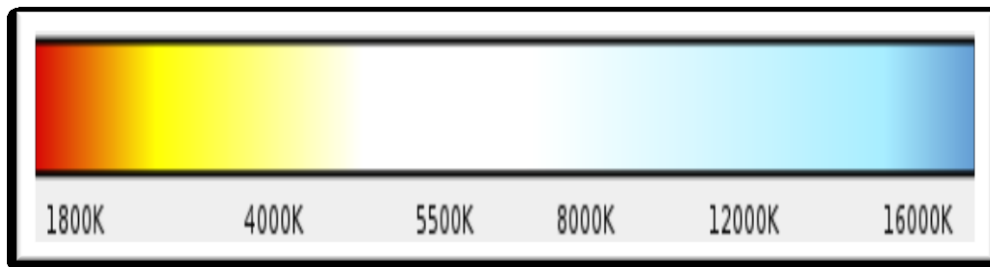
### 3.5.4 Blikání - přerušovaný režim činnosti

Mezi vláknovou wolframovou žárovkou a svítivou diodou v některých směrech lze vidět určitou podobnost, ovšem výkonovým LED, na rozdíl od vláknových wolframových žárovek přerušovaný proces svícení „nevadí“. Důvodem je, že odpor studeného vlákna dosahuje podstatně nižší hodnoty než odpor rozžhaveného vlákna žárovky, a proto při zapnutí hrozí přerušení vlákna žárovky, naopak výkonovým LED tento režim provozu relativně „prospívá“ z důvodu lepšího chlazení součástky.

### 3.5.5 Teplota chromatičnosti - barevná teplota

Teplota chromatičnosti neboli také barevná teplota, popisuje spektrum bílého záření. Světlo určité teploty chromatičnosti má barvu vnitřní energie (tepla) záření vyzařované černým předmětem zahřátým na teplotu v Kelvinech (obrázek 3.5.5). V praxi se lze setkat s odvozenou americkou jednotkou mired podle vztahu  $1 \text{ mired} = 1\,000\,000 / \text{teplota chromatičnosti}$  v kelvinech (teplotě chromatičnosti 2 000; 4 000; 6 000; 8 000; 10 000 K, odpovídá 500; 250; 166,7; 125; 100 mired). Různými teplotami chromatičnosti se dá vytvořit dojem studeného, neutrálního nebo teplého dojmu prostředí. Teplota chromatičnosti výkonových LED může být různá, v rozsahu od hodnoty 2 800 K (teplé světlo) až po hodnotu 9 000 K (studené světlo).

Např. u výkonové LED bílé barvy dochází ke změně chromatičnosti pouze tehdy, kdy část fotonů vycházející z čipu výkonové LED pomocí luminoforu se převede na světlo žluté barvy.



*Obr. 3.5.5 Stupnice teploty chromatičnosti.*

### **3.5.6 Napájení**

Výkonové LED jsou polovodičové součástky, a proto v jejich obvodě musí být použit stejnosměrný proudový zdroj, který napájí výkonovou LED elektrickým proudem v propustném směru. Přední firma ve výrobě polovodičových součástek Seoul Semiconductor, však objevila princip, který umožňuje použít střídavý zdroj. Jedná se o el. zapojení, kde jsou čipy výkonových LED zapojeny sériově (anti-paralelně) a v první polovině periody svítí pouze jeden čip a ve druhé polovině periody si čipy LED funkci prohodí. Tento druh el. zapojení, ale měl řadu nevýhod, díky nimž dosahovaly výkonové LED napájené střídavým zdrojem např. u parametru světelná účinnost maximálně 35 lm/W.

### **3.5.7 Světelná účinnost**

Množství světla (lumenů), které výkonová LED vyzáří na 1 watt elektrického příkonu nazýváme světelná účinnost. U Výkonových LED se můžeme setkat s hodnotou světelné účinnosti blížící se až k hodnotě 100 lm/W. K porovnání vláknová wolframová 60 W žárovka má světelnou účinnost 15 lm/W, halogenové žárovky 25 lm/W a zářivka 60 lm/W.

Laboratorní „vysoce“ výkonové LED s hodnotou příkonu 100 W mohou dosáhnout světelné účinnosti až 150 lm/W a tím dokáží vyzářit množství světla o hodnotě až 7 000 lm a se svojí světelnou účinností se dokážou přiblížit k nízkotlakovým sodíkovým výbojkám.

V současnosti za nejúčinnější světelné zdroje lze tedy považovat tyto nízkotlakové sodíkové výbojky dosahující světelné účinnosti od 150 do 200 lm/W. Teoretické maximum se 100 % účinností by odpovídalo 683 lm/W.

Kolem roku 2010 dostupné výkonové bílé LED vstoupily do přímé konkurence se všemi ostatními zdroji světla a ve světelné účinnosti současné známé světelné zdroje začaly předbíhat. Cílem je, aby se na trh dostaly cenově přijatelné výkonové bílé LED se světelnou účinností 160 lm/W.

### **3.5.8 Účinnost**

Účinnost všech světelných zdrojů je kvantum elektrické energie, která je přeměněna na světlo vyjádřená v procentech. Zbytek elektrické energie, která není přeměna na fotony (světlo), je přeměněna na fonony (teplo), a proto je celková účinnost výkonové LED nepřímo úměrná zahřívání (teplotě) čipu výkonové LED. Z hlediska celkové účinnosti výkonové LED a prodloužení životnosti zařízení je nutné účinným způsobem odvést nežádoucí teplo z čipu výkonové LED.

Výkonové LED, stejně tak jako i jiné elektronické součástky, nedosahují účinnosti, která by byla rovna hodnotě 100 %. V praxi možná dosažitelná účinnost nejmodernějších výkonových LED se pohybuje v rozmezí 40 až 50 %. K porovnání opět vláknová wolframová 100 W žárovka dosahuje hodnoty pouze kolem 5 %. A však v současné moderní době již ve výzkumných laboratořích existují vzorky výkonových LED, jejichž účinnost převyšuje hranici 50 %.

### **3.5.9 Teplotní závislost**

Při změně teploty LED čipu dochází také ke změně vlnové délky a šířky spektra světelného záření. S rostoucí teplotou čipu LED dochází k poklesu energie zakázaného pásu PN přechodu výkonové LED, a proto je z LED čipu emitováno tzv. monochromatické záření o delších vlnových délkách. V opačném případě se snižující teplotou na čipu výkonové LED je emitováno monochromatické záření o kratších vlnových délkách. V praxi se však změnou vlnové délky při změně teploty nemusíme zabývat z důvodu malých změn a jsou tedy naprosto zanedbatelné (definovány v katalogu výrobce). Příkladem jsou bílé výkonové LED, u kterých se nám určitá část fotonů vycházející z čipu LED převede na žluté světlo za pomoci luminoforu.

### **3.5.10 Životnost**

V současné době není plně porozuměno všem mechanismům degradace optických vlastností a rekombinačnímu procesu excitonů u výkonových LED založených na GaN, které tvoří výhradní sortiment dnešního trhu výkonových LED.

U výkonové LED na rozdíl od vláknové wolframové žárovky nedojde k okamžitému zničení celé součástky, ale postupem času dochází k degradaci světelného záření. Provozní čas je závislý na teplotách a procházejícím proudu výkonovou LED. Čím jsou tedy tyto dvě hodnoty vyšší, tím se zkracuje životnost výkonové LED. Lidské oko rozpozná pokles světla při poklesu intenzity výkonové LED na 70 %. U některých výkonových LED může dojít k poklesu až při 20 000 hodinách provozu, ale v laboratorních podmínkách se můžeme i setkat s dobou provozu blížící se k hodnotě 100 000 hodin. Provozní doba je ovlivněna pracovní hodnotou teploty a hodnotou proudu procházející přes PN přechod výkonové LED. U většiny výkonových LED je intenzita světla 100 % i při provozu 10 000 hodin.

Možno však poznamenat, že kromě pozvolné degradace svítivosti výkonových LED je samozřejmě možný i případ, kdy dojde k náhlé degradaci výkonové LED, která se nejčastěji projeví přerušáním elektrického obvodu (v podstatě jde o způsob degradace, která je totožná s přetavením vlákna wolframové žárovky). K postupné degradaci u výkonových LED dochází také i při trvalém zkratu jejich svorek.

## **3.6 Výkonová bílá LED**

Bílé LED jsou nejmladším typem svítivých diod. Přijatelný způsob technologie výroby pro výkonovou LED byl objeven až začátkem 90. let. Jejich význam vzrůstá s vývojem technologií výkonových LED.

### **3.6.1 Generování bílého světelného záření**

**Generování bílého světelného záření je uskutečňováno dvěma způsoby:**

- využitím více barevných LED;
- použitím LED a luminoforů;

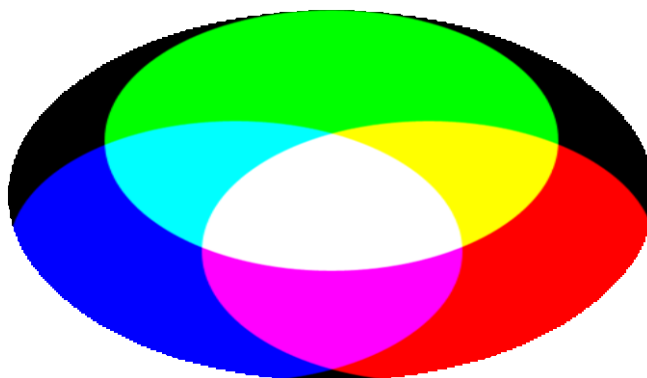


#### **Generování světelného záření použitím více barevných LED:**

- modrá - žlutá;
- modrá - zelená - červená (RGB);
- modrá - zelená - žlutá - červená;
- kombinace LED a luminoforu;

#### **Generování světelného záření použitím kombinace LED a luminoforu:**

- modrá LED a žlutý luminofor (YAG);
- UV LED a červený - zelený - modrý luminofor;
- kombinace modré a červené, případně jiných barev LED a luminoforů;



*3.6.1 Aditivní směšování barev.*

Nejčastějším způsobem realizace bílé LED je z cenových důvodů kombinace modré LED a luminoforu. Podle použitého luminoforu může mít světelné záření odstín od nažloutlé barvy po namodralou barvu.

#### **3.6.2 Specifické vlastnosti výkonové bílé LED**

Jak bylo napsáno dříve, část energie, která není přeměněna na světelné záření, se přemění na teplo. Uvažujeme-li o provozu bílé výkonové LED, napájené z konstantního zdroje proudu např. 400 mA, vznikne na diodě úbytek napětí v rozmezí hodnot od 2,5 do 4 V. Celkový příkon svítivé diody tedy bude v „nejhorším“ případě roven 1,6 W.

Pokud máme hodnotu účinnosti 30 % výkonové LED, pak se při trvale aktivně výkonové LED na teplo přemění výkon 1,2 W. Z hlediska celkové účinnosti výkonové LED a prodloužení životnosti zařízení je nutné účinným způsobem odvést nežádoucí teplo z LED čipu.

**Odstín bílého záření je udáván teplotou chromatičnosti = barevná teplota:**

**Teplý odstín** - teplá bílá (2 800 - 3 300 kelvinů).

- nažloutlý či naoranžovělý, podobný klasické žárovce, působí příjemně a útulně;
- doporučené použití: obývací pokoj, ložnice, dětský pokoj;

**Studený odstín** - bílá (5 000 - 6 000 kelvinů).

- je pocitově neutrální;
- doporučené použití: kuchyň, koupelna, pracovna;



*Obr. 3.6.2 Výkonová bílá LED.*

### 3.7 Výhody a nevýhody

**Výhody:**

- velmi vysoká hodnota přípustné pracovní teploty LED čipu (až 150 °C);
- mechanicky velmi malá elektronická součástka;
- velká hodnota proudu v propustném směru až 1 A;
- hodnota CRI je vyšší než 80;
- jmenovitý výkon (příkon) až 10 W;

- světelná účinnost v průměru 90 lm/W;
- trichromatické souřadnice barvy emitovaného světla vyhovují požadavkům definovaných vyhláškou 173/1995 sb.;
- obsahuje elektricky izolovaný vývod „Thermal Pad“ z anody a katody určený pro odvod tepla z LED čipu;
- vysoká mechanická odolnost (nárazy, otřesy...);
- pouzdro ani jiné části výkonové LED neobsahují prvky ohrožující životní prostředí;
- prakticky nulová absorpce vlhkosti okolního prostředí pouzdrem výkonové LED;
- životnost až 100 000 hodin;
- po zapnutí poskytují plný světelný výkon;
- nízká povrchová teplota;

#### **Nevýhody:**

- podstatně vyšší cena oproti klasickým LED či vláknovým wolframovým žárovkám (počítáno v ceně za lumen);
- v případě vyšších teplot se musí zajistit dostatečné chlazení (chladič);
- musí být napájeny správným proudem, což někdy komplikuje použití;
- barevná teplota světla výkonové bílé LED záleží na použitém luminoforu;
- levné výkonové bílé LED se vyrábí s nekvalitním luminoforem, který způsobí nepříjemnou namodralou barvu světla;
- světlo bílých výkonových LED je nerovnoměrné, takže dochází k jejich zkreslení;

### **3.8 Použití**

V současné době se s výkonovými LED můžeme nejvíce setkat v různých LED žárovkách, kde výkonové LED úspěšně nahrazují pro osvětlení nevhodné klasické 5 mm svítivé diody. Technologie výroby výkonových LED se zlepšuje rychlým tempem a tak se můžeme setkat s výkonovou LED, která dokáže poskytnout 100 lm/W, takže 13 ks jednowattové výkonové LED s tímto světelným tokem poskytuje srovnatelný světelný tok se 100 W čirou vláknovou wolframovou žárovkou (1340 lm).

Vzhledem k tomu, že účinnost žárovek klesá s jejich výkonem, tento poměr se u menších výkonů ještě zlepšuje, takže klasickou 25 W žárovku (215 lm) lze nahradit 2 ks jednowattové výkonové LED. Je tedy více než jasné, že použitím světelných zdrojů založených na výkonové LED lze ušetřit nemalé finanční prostředky za elektrickou energii a to i přes to, že světelné zdroje založené na výkonových LED jsou podstatně dražší než klasické žárovky. Díky své účinnosti jsou výkonové LED velmi používanými zdroji světla v přenosných zdrojích světla všech velikostí. Díky výkonové LED s velkou účinností lze dosáhnout velmi vysokého světelného toku za podstatně nižšího příkonu. Toto se projeví v dlouhé životnosti zdrojů elektrické energie, jakými jsou v těchto případech baterie či akumulátory.

#### **Porovnání vybraných parametrů výkonových LED od různých výrobců:**

V uvedené tabulce 3.8 představuje známka 1 nejlepší možné ohodnocení, známka 3 nejhorší. Podle tohoto ohodnocení je tedy patrné, že jednoznačných výsledků ve srovnání s ostatními certifikovanými výrobci výkonových LED dosáhly výrobky od firmy Philips.

Výrobce	Maximální přípustná teplota čipu	Vyzařovací úhel	Mechanické rozměry součástky	Pořizovací náklady
Philips	1	1	1	1
Cree	1	3	2	2
Osram	3	2	3	3

*Tab. 3.8 Srovnání základních parametrů výkonových LED od různých výrobců.*

## 4 REALIZACE PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ

Podle zadání jsem nejprve provedl realizaci praktického měření, kde jsem sestavil elektrický obvod pro měření spektrální propustnosti světla vybraných vzorků materiálů, které jsem vkládal do kyvet a pomocí spektrometru a softwarového programu SpectralSuite zpracoval spektrální charakteristiky výkonových LED. Jako zdroj světla jsem použil bílou a později modrou výkonovou LED.

Pro druhé praktické měření jsem sestavil elektrický obvod, kde jsem ověřil změny ve spektrech výkonových LED při opakované teplotní expozici. Za použití inkubátoru Memmert a výkonové LED v ní vložené, která byla zahřívána pomocí ohříváné vody nalité do inkubátoru, jsem opět za pomoci spektrometru a softwarového programu SpectralSuite změnil spektrální charakteristiky. Zdrojem světla byla znovu použita bílá a později modrá výkonová LED.

### 4.1 Spektrometr USB650 Red Tide

Spektrometr USB650 Red Tide je plně přednastavený spektrometr (optická mřížka, velikost štěrby), který lze kombinovat s doplňujícími spektrometrickými produkty od firmy Ocean Optics (např. světelné zdroje či snímače) tak, aby bylo možné dosáhnout konkrétních aplikačních požadavků (absorbance, transmittance...).

Komunikace přístroje s počítačem je zajištěna pomocí USB kabelu, přes který je spektrometr také napájen. Spektrometr lze také připojit k určitému zařízení, které pak představuje kombinaci tzv. datalogger a analytického zařízení, pro použití bez připojení k počítači.

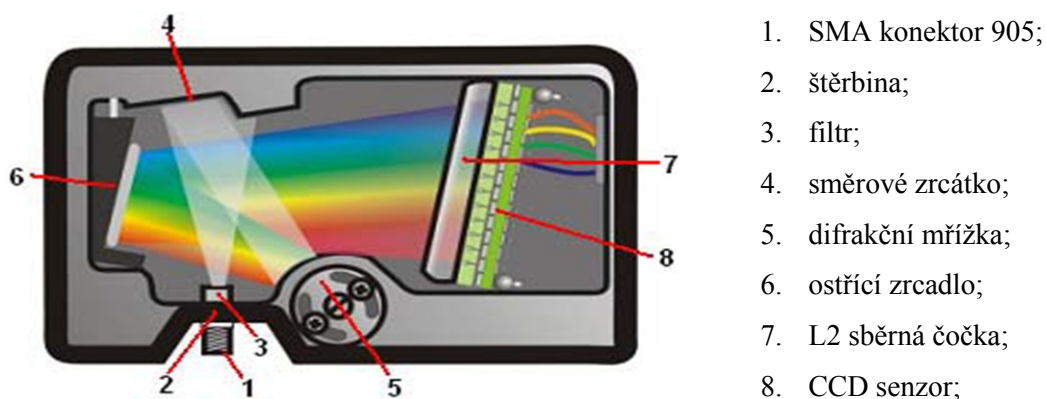
#### Specifikace:

- rozsah vlnové délky: 350 - 1 000 nm;
- rozlišení: 2 nm (FWHM);
- detektor: CCD, 650 pixelů;
- optika: 25μm štěrbina;
- konektor: SMA 905;
- integrační doba: 3 ms - 65 s;



Obr. 4.1 Spektrometr USB 650 Red Tide.

#### 4.1.1 Princip činnosti spektrometru



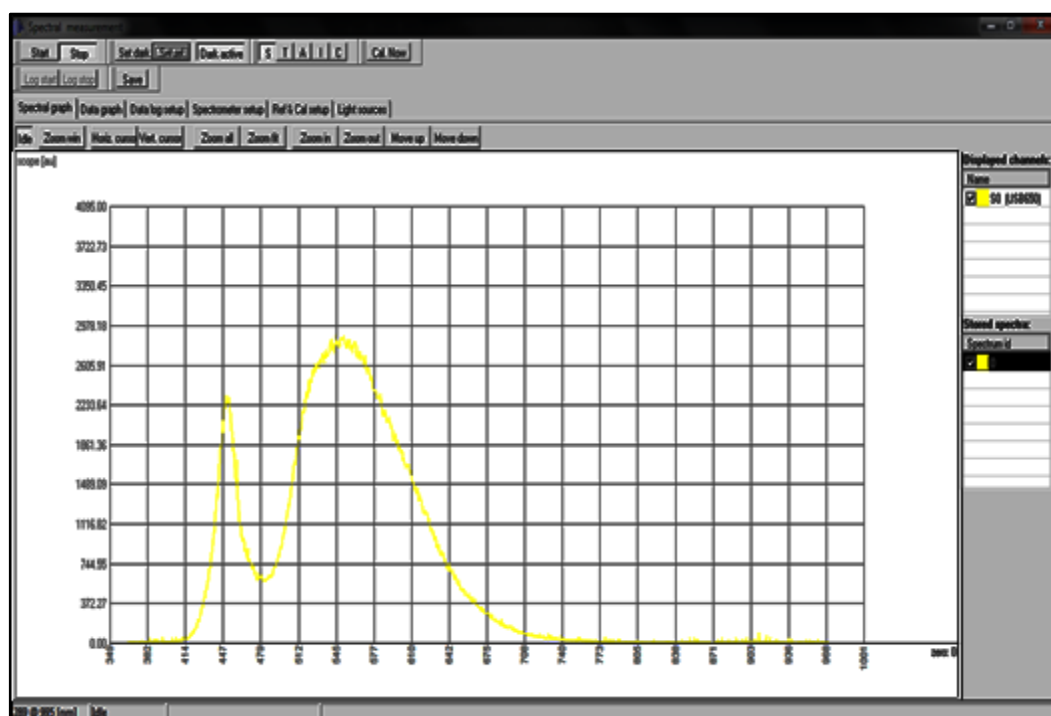
Obr. 4.1.1 Struktura spektrometru USB650 Red Tide.

1. **SMA konektor 905** - zajišťuje vstup světla do spektrometru pomocí optického vlákna.
2. **Štěrbina** - tmavá část spektrometru obsahující pravoúhlý vstup, který je připevněn za SMA konektor 905. Velikost otvoru ovládá množství procházejícího světla do spektrometru a slouží k řízení spektrálního rozkladu.
3. **Filtr** - zařízení omezující optické záření na předem určený rozsah vlnových délek. Přes filtr prochází světlo, než vstoupí do spektrometru. K omezení oblasti vlnových délek při průchodu světla se využívá pásmová popřípadě délková transmittance (propustnost).
4. **Směrové zrcátko** - zaostřuje světlo, které vstupuje do středu spektrometru postupně k difrakční mřížce. Světlo vstoupí do spektrometru přes SMA konektor 905, štěrbinu a filtr, nakonec se odráží od směrového zrcátka na difrakční mřížku.
5. **Difrakční mřížka** - slouží k ohybu světla ze směrového zrcátka a postupně ho směruje na ostřicí zrcadlo. Difrakční mřížky jsou vytvářeny ve více hustotách drážkování, které umožňují omezení oblasti pokrytí vlnových délek.
6. **Ostřicí zrcadlo** - přijímá odražené světlo z difrakční mřížky a zaostří ho na tzv. CCD detektor nebo na L2 sběrnou čočku (konfigurace spektrometru).

7. **L2 sběrná čočka** - je součástí CCD senzoru a slouží ke zvýšení efektivity snížením působení odraženého světla. Zaostruje světlo ze štěrbinu na prvky CCD senzoru. Štěrbinu senzoru by se měly používat při nízkých hladinách světla nebo by měly většího průměru.
8. **CCD senzor** - slouží k zachycení světla, které přijme z ostřicího zrcadla nebo z L2 sběrné čočky a potom dojde k převodu optického signálu na digitální. Všechny pixely na CCD senzoru reagují na změnu vlnové délky světla, která vytváří digitální odezvu. Nakonec spektrometr tuto odezvu posílá ve formě informací přes USB kabel do počítače softwarové aplikaci SpectralSuite.

#### 4.1.2 SpectralSuite

SpectralSuite je softwarový program používaný spektrometry od firmy Ocean Optics, který dokáže pracovat nejen na operačním systému Windows, ale i Linux či Macintosh. Jedná se o program založený na platformě jazyka JAVA, který slouží pro spektroskopické měření jako je např. absorpce, propustnost atd. Používá se ke shromažďování a zobrazení naměřených dat v reálném čase a ke sledování naměřených dat při různém nastavení integrační doby neboli doby zpoždění (obrázek 4.1.2).



Obr. 4.1.2 Ukázka spektra v programu SpectralSuite.

Uživatelské rozhraní je rozděleno na dvě části. Levá polovina obrazovky slouží pro zobrazení spektrální charakteristiky, řízení a nastavování parametrů, a pravá část slouží pro zobrazení kanálů a načtení uložených spekter.

**V 1. horní části jsou tlačítka související se zobrazením měřených dat:**

- zoom win - zobrazení vybrané oblasti;
- horiz. cursor - umístění a nastavení polohy horizontálního kurzoru;
- vert. cursor - umístění a nastavení polohy vertikálního kurzoru;
- zoom all - přepnutí zobrazované plochy do výchozího okna;
- zoom fit - přizpůsobí velikost okna zobrazovanému spektru;
- zoom in - zmenší velikost okna;
- zoom out - zvětší velikost okna;
- move up - pohyb směrem nahoru;
- move down - pohyb směrem dolů;

**V 2. horní části jsou tlačítka rozdělena do 3 důležitých bloků, slouží k nastavení měřících parametrů spektrometru:**

**I. Control**

- start - spuštění měření spektrální charakteristiky;
- stop - zastavení měření spektrální charakteristiky;

**II. Reference - provádění srovnávacích měření**

- set dark - sejmutí pozadí;
- set ref - sejmutí referenčního zdroje;
- dark active - aktivace pozadí;

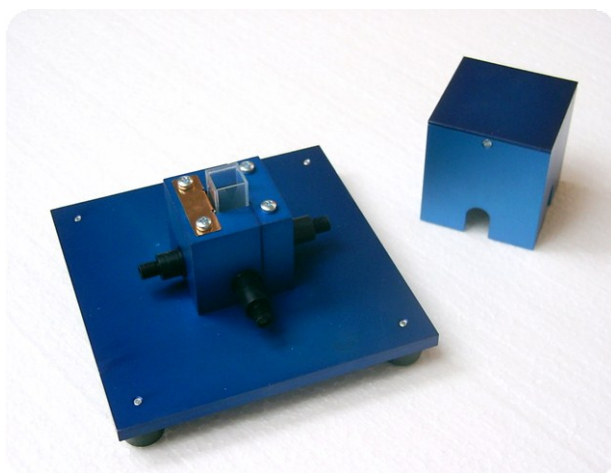
**III. Display mode**

- S - Scope, zobrazení reálných dat spektrometru;
- T- Transmission = Transmittance;
- A - Absorption = Absorbance;



## 4.2 Univerzální držák kyvet s krytkou

Jedná se o čtyřportový držák standartních kyvet, který umožňuje analyzovat kapalné vzorky. Změnou vzájemné polohy vstupních vláken je možné měřit jak absorbanci, tak fluorescenci. Porty jsou vybaveny kolimační optikou - čočkou - pro fokusaci optického svazku. Součástí je i stínící krytka pro snížení vlivu změn okolního záření během experimentů.



*Obr. 4.2 Univerzální držák kyvet s krytkou.*

## 4.3 Propojovací optický kabel (patchcord)

Propojovací kabely jsou vyrobeny se standartních plastových vláken (PMMA), průměr je 1000  $\mu\text{m}$ , délky 1m, zakončení konektory SMA 905. Kabely slouží k propojení zdroje záření, držáku kyvet a spektrometru.



*Obr. 4.3 Propojovací optický kabel (patchcord).*

## 4.4 Spektrální propustnost vybraných vzorků

**Transmittance (lat. Transmitto = převádím, propouštím)**

Množství světla určité vlnové délky, které prošlo vzorkem, popisuje veličina transmittance. V praxi by bylo nevhodné měřit přesně obě intenzity. Kromě vlastností vzorku jsou ovlivněny i absorpcí a odrazem světla na stěnách kyvety a v optice fotometru, prostředím, v němž probíhá měření atd. Proto se obvykle měří transmittance relativně vzhledem ke slepému (prázdnému) vzorku. Nejprve se změří intenzita světla procházejícího slepým vzorkem (referenčním vzorkem), tj. roztokem obsahujícím všechny složky vyjma stanovované barevné látky. Pak se za stejných podmínek měří intenzita světla procházejícího neznámým vzorkem.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

T - transmittance;

I - intenzita světla, které prošlo vzorkem;

$I_0$  - intenzita světla, které do vzorku vstoupilo;

V softwarovém programu SpectralSuite docílíme měření spektrální propustnosti vybraných vzorků pomocí tlačítka T.

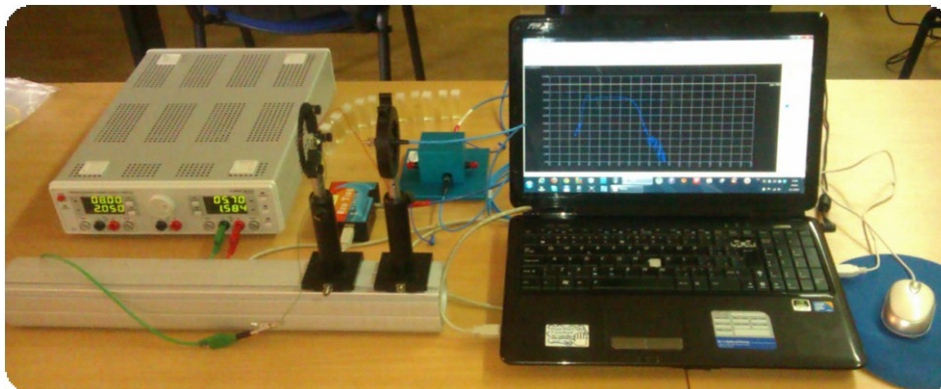
$$T = \frac{S - D}{R - D} \times 100$$

S - změřené spektrum;

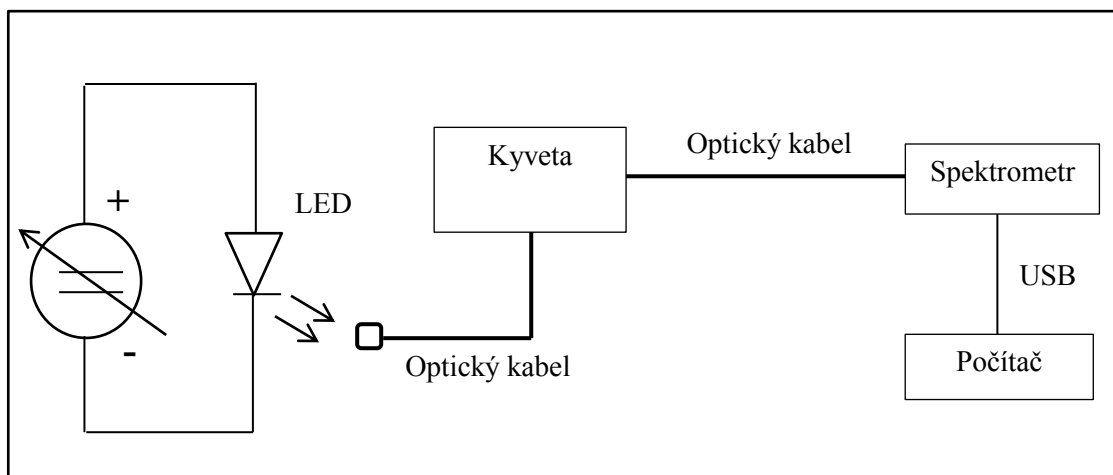
D - sejmuté spektrum pozadí;

R - referenční spektrum;

### 4.4.1 Schéma zapojení č. 1



*Obr. 4.4.1.1 Pracoviště praktického měření č. 1.*



Obr. 4.4.1.2 Blokové schéma zapojení č. 1.

#### 4.4.2 Postup měření č. 1

Pracoviště praktického měření je tvořeno z elektrického obvodu, který je napájen ze stejnosměrného regulovatelného napájecího zdroje HAMEG HM8143, kterým ovládám intenzitu světla výkonové LED. Výkonová LED je pevně uchycena v držáku, a před ní umístěn optický kabel, kde jeden konec je uchycen do svého držáku a namířen přímo na výkonovou LED a druhý konec je zapojen do spektrometru, který nám analyzuje spektrum světelného záření. Tyto oba dva držáky jsou připevněny k tzv. kolejnici. Spektrometr dále posílá ve formě dat tyto informace přes USB kabel do počítače, kde jsem pomocí jeho softwarového programu SpectralSuite mohl vidět spektrální charakteristiky výkonové LED.

Nejprve jsem si proměřil voltampérovou charakteristiku bílé i modré výkonové LED a později již zmiňované spektrální charakteristiky. Jednalo se o spektrální charakteristiky v závislosti pracovní vlnové délky  $\lambda_0$  a protékajícího proudu  $I$  a šířky spektrální charakteristiky  $\Delta\lambda$  a protékajícího proudu  $I$ .

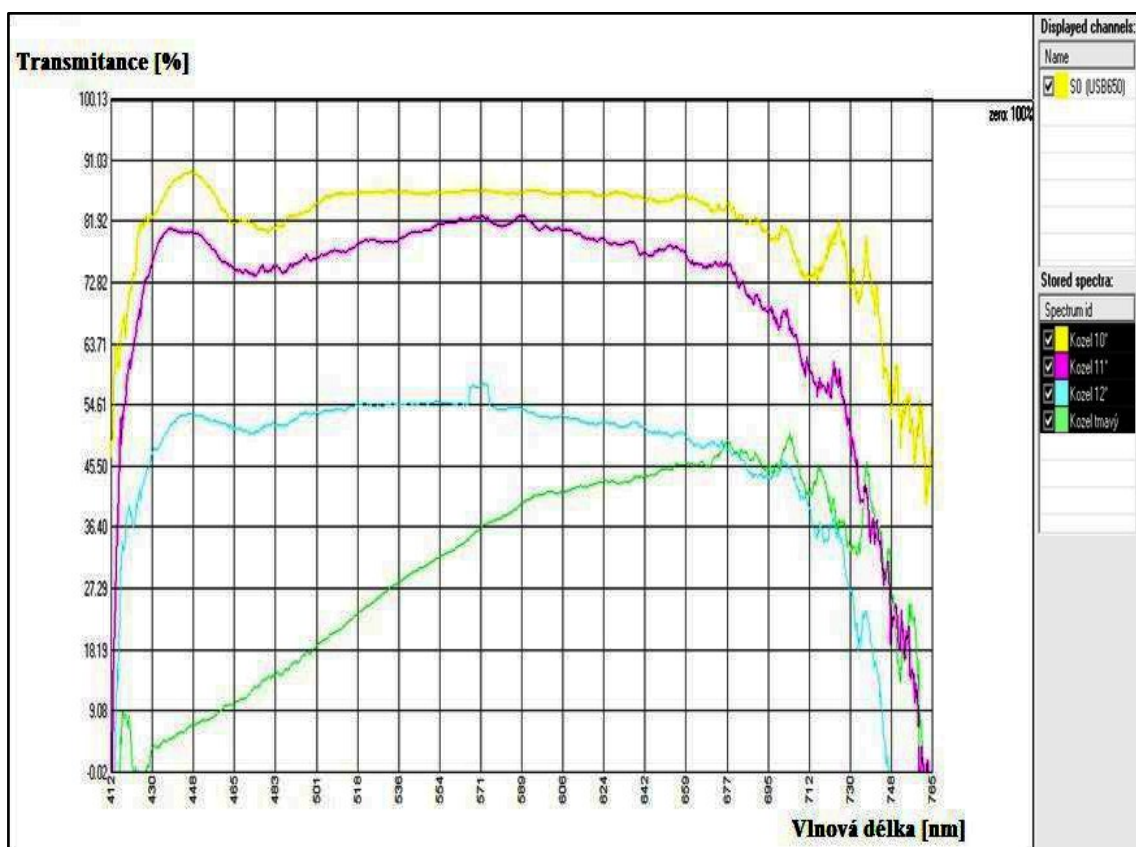
Později jsem do tohoto elektrického obvodu, který je konstantě napájen elektrickým proudem 100 mA, připojil univerzální držák kyvet s krytkou, do kterého jsem postupně vkládal naplněné kyvety různými vzorky materiálů, v mém případě se jedná o různé vzorky piva. Do jednoho konce kyvety jsem připojil optický kabel, který byl opět přímo namířen na výkonovou LED a z druhého konce kyvety byl vyveden optický kabel, který byl zapojen do spektrometru. V softwarovém programu SpectralSuite jsem mohl vidět změny spektrální charakteristiky výkonové LED při změně vybraných vzorků.

#### 4.4.3 Tabulky a grafické zpracování

- Bílá výkonová LED (2407 LXHL - LW6C).

Vzorek	T [%]	$\lambda_0$ [nm]
Pilsner Urquell	93,43	447
Velkopopovický Kozel 10°	89,55	447
Velkopopovický Kozel 11°	83,08	572
Radegast Birell	75,28	573
Radegast 10°	66,52	573
Staropramen nefiltrovaný	65,48	574
Velkopopovický Kozel 12°	57,98	589
Gambrinus 10°	53,58	571
Velkopopovický Kozel tmavý	50,47	705
Heineken	25,62	445

Tab. 4.4.3.1 Maximální propustnost světla 10 vzorků materiálů bílé výkonové LED.

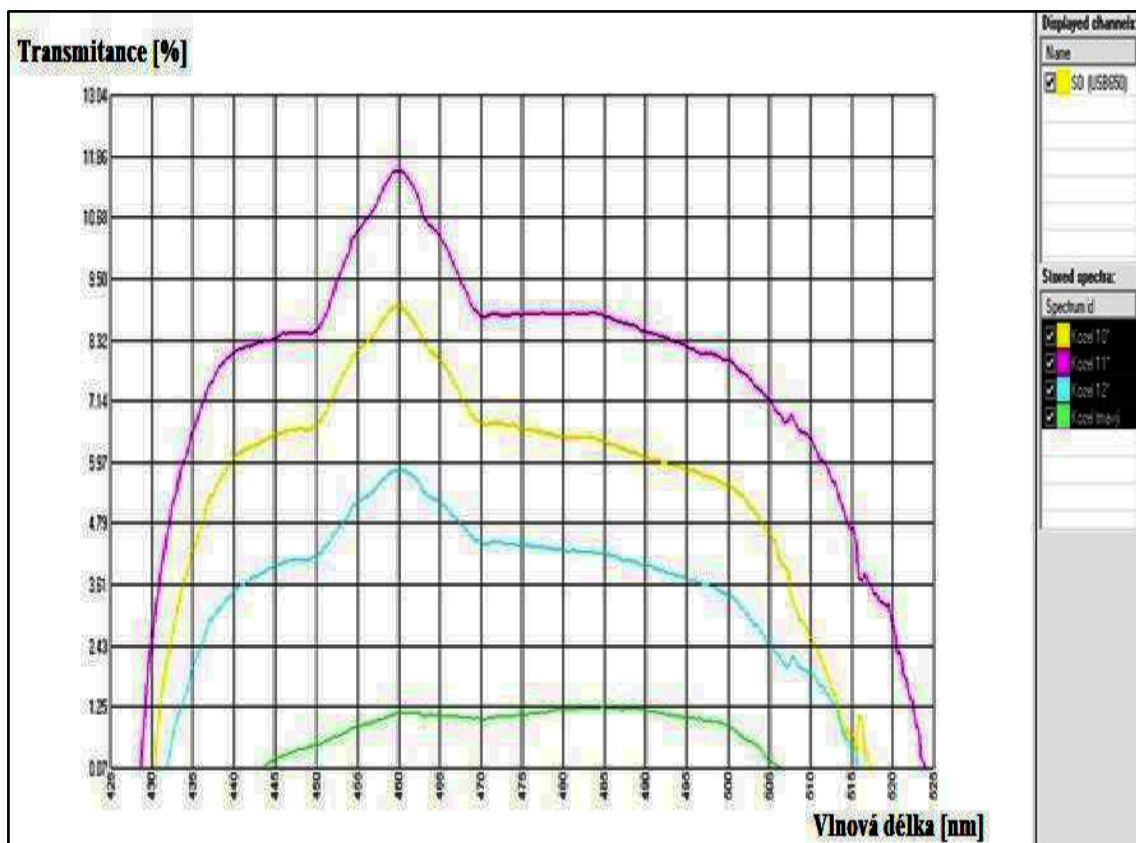


Obr. 4.4.3.1 Propustnost světla 4 vybraných vzorků materiálů bílé výkonové LED.

- **Modrá výkonová LED (4507 LXHL - LR5C).**

Vzorek	T [%]	$\lambda_0$ [nm]
Velkopopovický Kozel 11°	11,6	460
Pilsner Urquell	9,96	460
Velkopopovický Kozel 10°	9,04	460
Radegast Birell	8,32	460
Radegast 10°	7,28	460
Velkopopovický Kozel 12°	5,87	460
Gambrinus 10°	5,65	460
Staropramen nefiltrovaný	4,53	460
Heineken	3,98	460
Velkopopovický Kozel tmavý	1,26	486

Tab. 4.4.3.2 Maximální propustnost světla 10 vzorků materiálů modré výkonové LED.



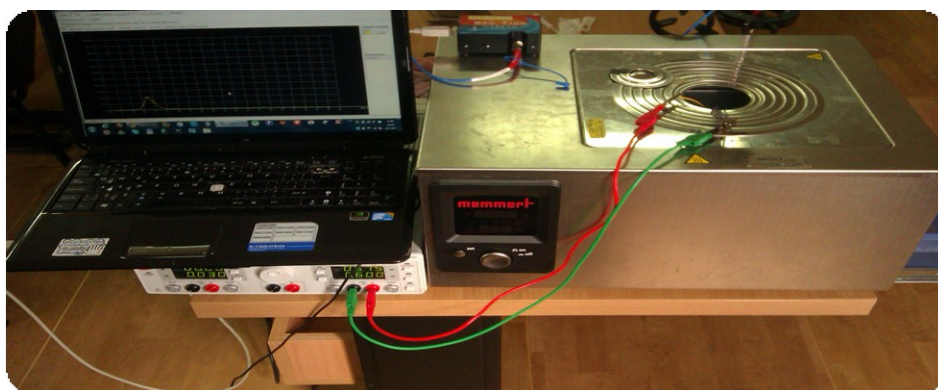
Obr. 4.4.3.2 Propustnost světla 4 vybraných vzorků materiálů modré výkonové LED.

## 4.5 Změna ve spektrech při teplotní expozici

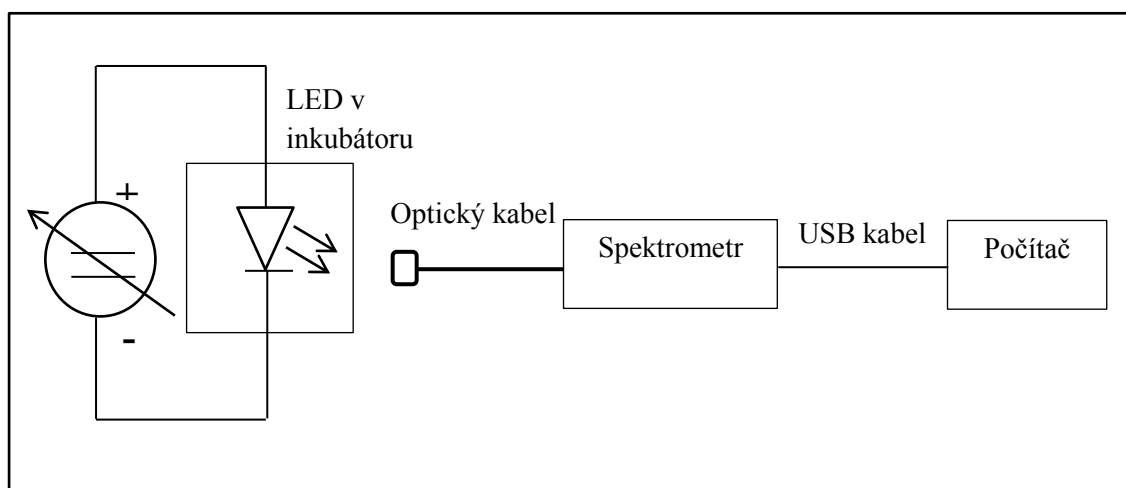
Teplota (lat. Temperatura = příjemný pocit)

Teplota je charakteristika tepelného stavu hmoty. Základní fyzikální veličina soustavy SI s jednotkou Kelvin (K) a vedlejší jednotkou stupeň Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K;  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), ke které se lze libovolně přiblížit, avšak jí nelze dosáhnout.

### 4.5.1 Schéma zapojení č. 2



Obr. 4.5.1.1 Pracoviště praktického měření č. 2.



Obr. 4.5.1.2 Blokové schéma zapojení č. 2.



## 4.5.2 Postup měření č. 2

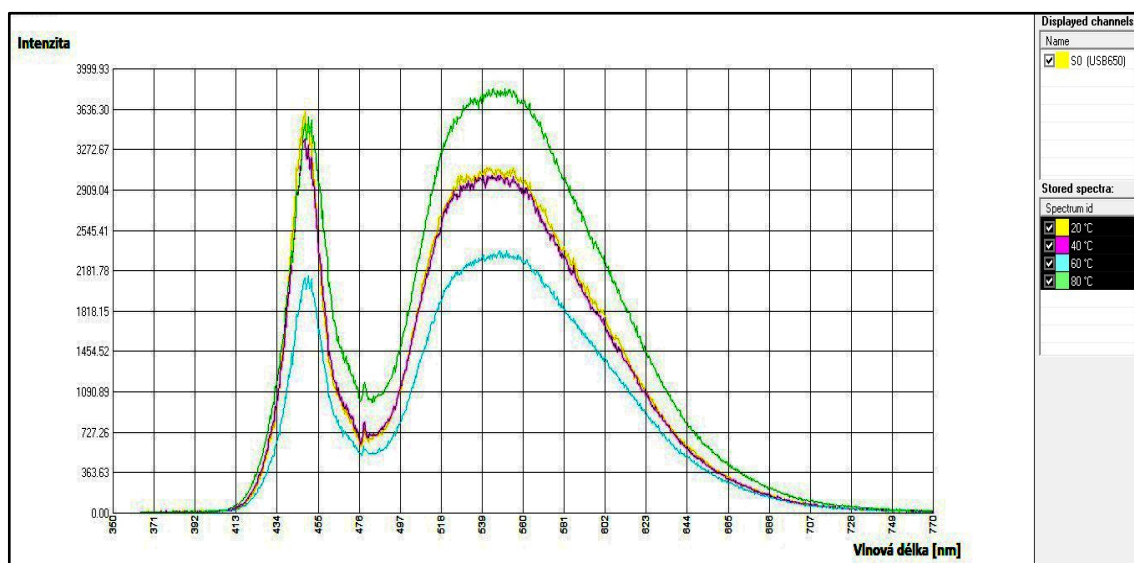
Pracoviště praktického měření je tvořeno z elektrického obvodu, který je napájen ze stejnosměrného regulovatelného napájecího zdroje HAMEG HM8143, kterým ovládáme intenzitu světla výkonové LED.

Výkonová LED byla vložena do inkubátoru Memmert, kde pomocí ohřívání vody topným tělesem došlo k zahřívání bílé a později modré výkonové LED. Naproti této výkonové LED je přímo namířen optický kabel, který je pevně uchycen v držáku a druhý konec je zapojen do spektrometru, který nám analyzuje spektrum světelného záření. Tento držák je připevněn k tzv. kolejnici. Spektrometr dále posílá ve formě dat tyto informace přes USB kabel do počítače, kde pomocí jeho softwarového programu SpectralSuite jsem mohl vidět spektrální charakteristiky výkonové LED.

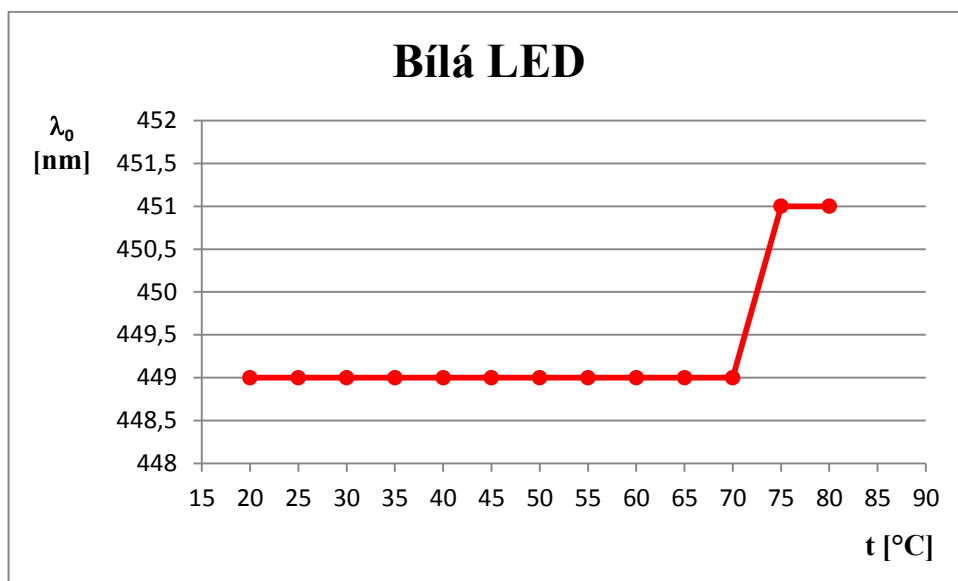
Elektrický obvod je konstantě napájen elektrickým proudem 100 mA a později 500 mA a vodu v inkubátoru (výkonovou LED) jsem zahříval od 20 °C po 80 °C. Postupně jsem měřil spektrální charakteristiku s krokem 5 °C a odečítal pracovní vlnovou délku  $\lambda_0$  a šířku spektrální charakteristiky vlnové délky  $\Delta\lambda$ .

## 4.5.3 Tabulky a grafické zpracování

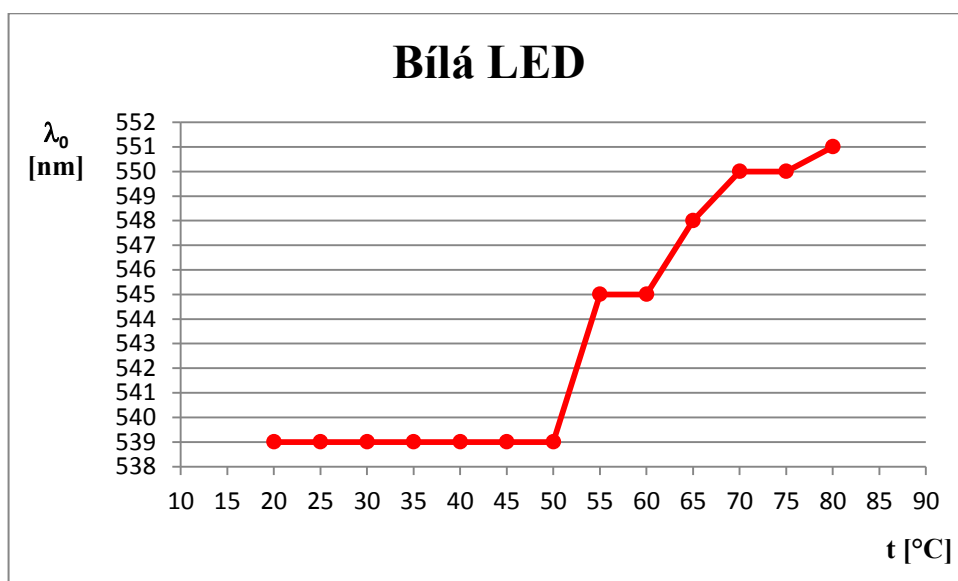
- Bílá výkonová LED ( $I = 100 \text{ mA}$ ).



Obr. 4.5.3.1 Změna spektra při teplotní expozici.

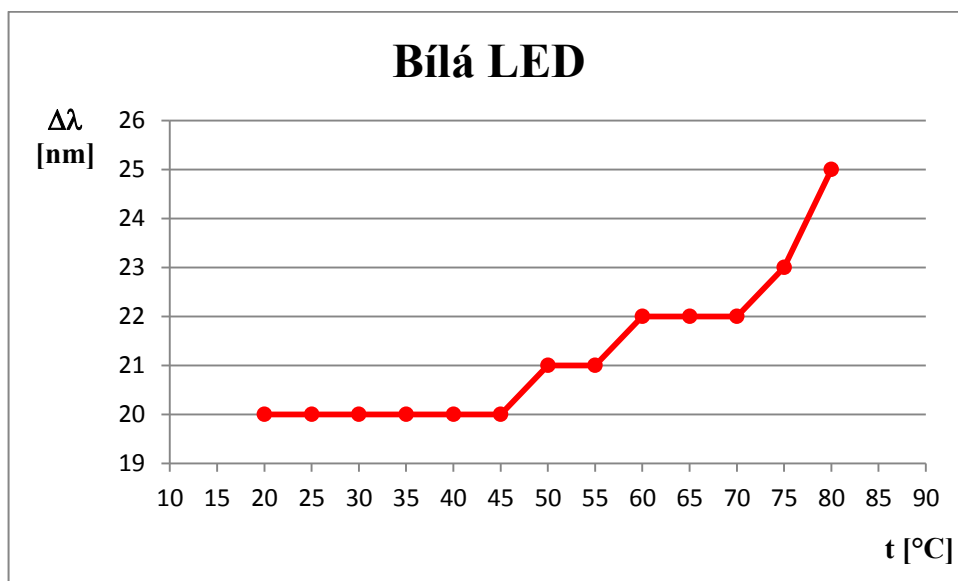


Graf 4.5.3.1 Závislost pracovní vlnové délky na teplotě.

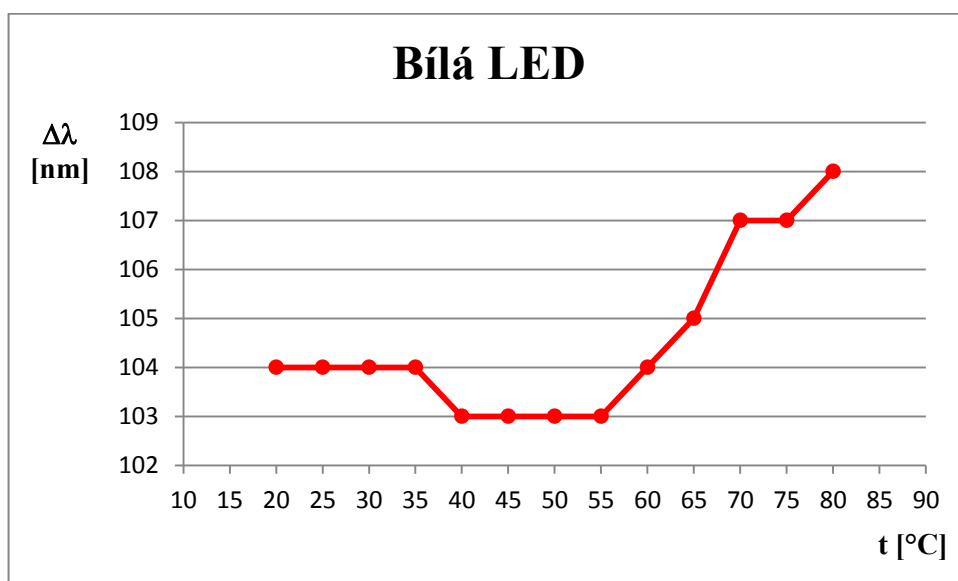


Graf 4.5.3.2 Závislost pracovní vlnové délky na teplotě.



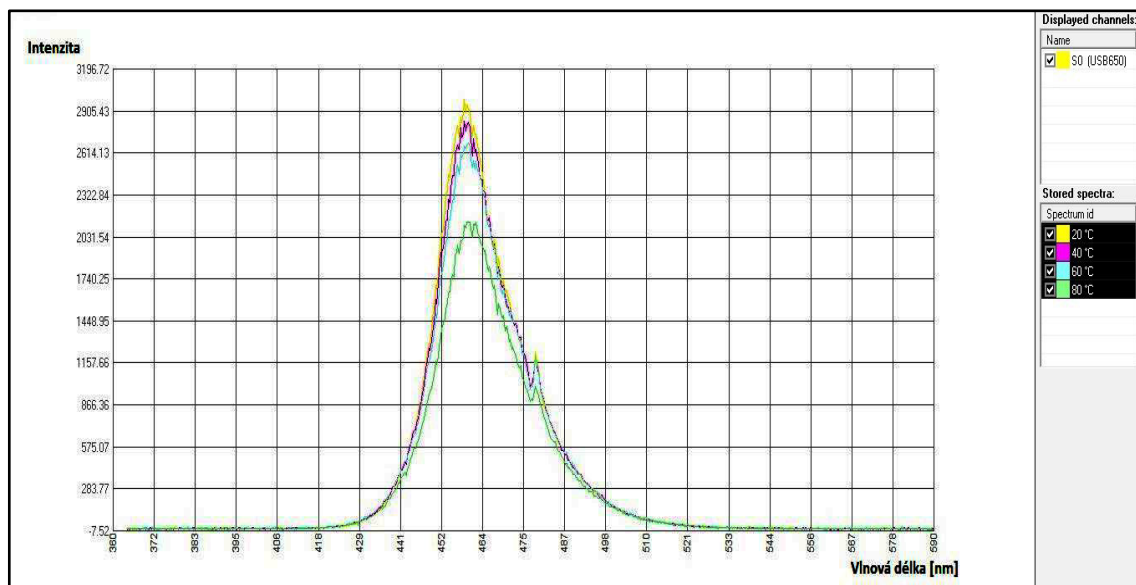


Graf 4.5.3.3 Závislost šířky spektrální charakteristiky na teplotě.

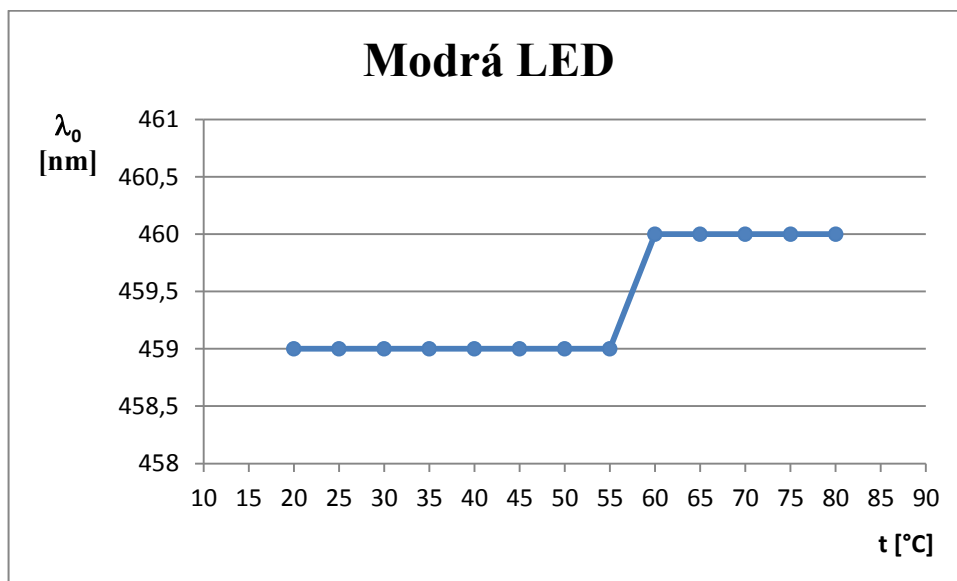


Graf 4.5.3.4 Závislost šířky spektrální charakteristiky na teplotě.

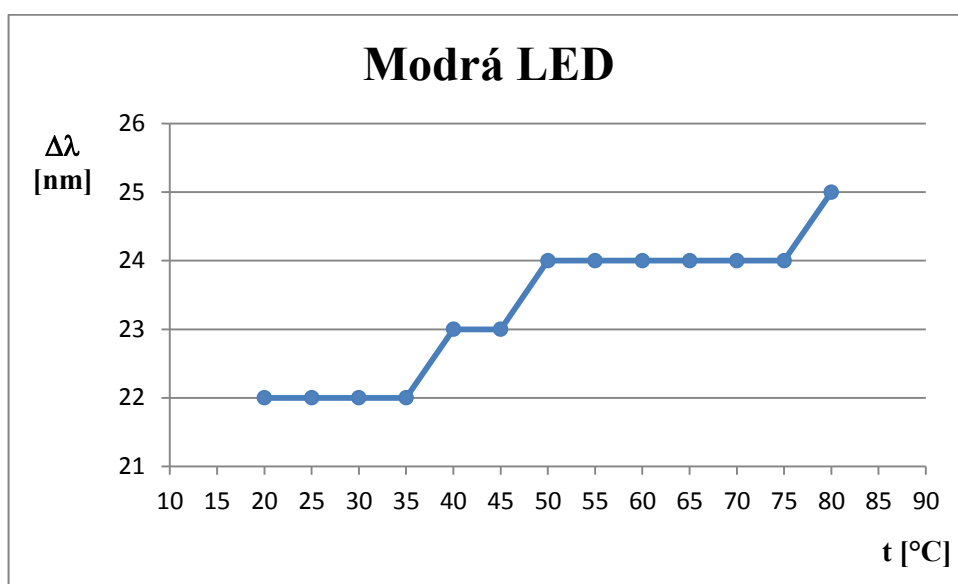
- **Modrá výkonová LED (I = 100 mA).**



Obr. 4.5.3.2 Změna spektra při teplotní expozici.



Graf 4.5.3.5 Závislost pracovní vlnové délky na teplotě.



Obr. 4.5.3.6 Závislost šířky spektrální charakteristiky na teplotě.

## 5 ZÁVĚR

V prvním praktickém měření jsem se zabýval propustností světla přes 10 vzorků materiálů, v mém případě se jednalo o 10 vzorků piva. Tento druh vzorků jsem vybral na základě zvědavosti o tom, jak kalný je určitý druh piva. Z uvedených charakteristik a tabulek je patrné, že při použití bílé výkonové LED při konstantním elektrickém proudu 100 mA a nastavením integrační doby (doby zpoždění) na hodnotu 1400 ms je propustnost světla u všech vzorků piva mnohonásobně vyšší, což je způsobeno zejména rozdílným výkonem a spektrem těchto dvou výkonových LED.

Maximální propustnost světla bílé výkonové LED u vybraného vzorku byla naměřena 93,43 % při pracovní vlnové délce 447 nm a při použití zdroje světla již zmiňované bílé výkonové LED. Tyto hodnoty patří vzorku piva Pilsner Urquell. Z těchto naměřených hodnot tedy vyplývá, že pivo Pilsner Urquell je velmi čisté a není kalné. Svým složením neobsahuje žádné škodlivé látky, které by mohly ublížit lidskému organismu. Naopak pivo Heineken má nejmenší maximální propustnost světla, pouze 25,62 % při pracovní vlnové délce 445 nm, což je velmi zajímavé v porovnání s pivem Velkopopovický Kozel tmavý, z důvodu jejich světlosti. Z této hodnoty maximální propustnosti světla je patrné, že tento druh piva je kalný a může obsahovat i škodlivé látky. Z uvedených hodnot lze jednoznačně konstatovat, že s klesající maximální propustností světla nám roste hodnota pracovní vlnové délky a tedy dochází k posunu spektrálních charakteristik směrem doprava po ose vlnové délky. Výjimkou je pouze vzorek piva Heineken, kde nám pracovní vlnová délka výrazně klesne a dochází k opačnému posunu po ose vlnové délky, tedy směrem doleva. Při použití modré výkonové LED jako zdroj světla nám kromě vzorku Velkopopovický Kozel tmavý při hodnotách maximální propustnosti světla zůstala hodnota pracovní délky neměnná při všech naměřených hodnotách maximální propusti.

Druhá část praktického měření byla zaměřena na změnu ve spektrech při teplotní expozici, kde jsem jako zdroj světla použil opět bílou a modrou výkonovou LED. Z naměřených charakteristik lze vidět, že postupným ohříváním výkonové LED od 20 do 80 °C se spektrální charakteristiky posouvaly po ose vlnové délky a měnily i svou šířku.

Při použití bílé výkonové LED, jako zdroje světla, jsem z důvodu širokého spektra musel odečítat dvě pracovní vlnové délky a šířky spektra. Při nastaveném konstantním proudu 100 mA z uvedených hodnot je zřejmé, že se spektrální charakteristiky s narůstající teplotou posouvaly směrem doprava.

K tomuto posunu v 1. části docházelo při hodnotě pracovní vlnové délky 451 nm a zahřátí výkonové LED na teplotu 75 °C. Ve 2. části spektrální charakteristiky docházelo k většímu posunu a tedy ke změně pracovní vlnové délky o 12 nm a to při zahřátí výkonové LED na teplotu 80 °C. Z naměřených hodnot šířky spektra v 1. části spektra docházelo s narůstající teplotou k rozšíření a naopak ve 2. části při hodnotách teplot pouze v rozmezí 40 - 55 °C k jejímu zúžení. Pokud jsem zvýšil hodnotu konstantního proudu na hodnotu 500 mA, tak docházelo s narůstající teplotou k většímu posunu, opět směrem doprava. V 1. části se spektrální charakteristika posouvala směrem doprava a změna pracovní vlnové délky byla 8 nm. K nejvyššímu posunu došlo při hodnotě pracovní vlnové délce 457 nm a při zahřátí výkonové LED na teplotu 70 °C. Ve 2. části se v rozmezí hodnot teplot 40 - 70 °C posouvala směrem doprava i doleva, což může mít i za následek nepříznivé vlivy okolí a šum. Hodnota pracovní vlnové délky nám tedy i klesla z hodnoty 550 nm na hodnotu 549 nm, ale při teplotě 70 °C došlo opět k jejímu nárůstu na hodnotu 556 nm. Z naměřených hodnot šířky spektra je pak zřejmé, že v 1. části spektra s narůstající teplotou docházelo k rozšíření. Ve 2. části došlo také k rozšíření s výjimkou rozmezí hodnot teplot 55 - 70 °C, kde došlo k jejímu zúžení. Pokud jsem použil modrou výkonovou LED napájenou konstantním proudem 100 mA nebo 500 mA, tak vždy docházelo k posunu spektrální charakteristiky směrem doprava a k rozšíření spektra. Rozdíl mezi těmito 2 spektrálními charakteristikami spočíval v tom, že při hodnotě 100 mA byla změna pracovní vlnové délky pouze 1 nm, což je zanedbatelná hodnota. Při hodnotě 500 mA byla tato změna už 9 nm a nejvyššímu posunu došlo při hodnotě pracovní vlnové délky 465 nm, což odpovídá zahřátí výkonové LED na teplotu 75 °C.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

1. Dioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 19. 3. 2005, 29. 3. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dioda>>
2. Index podání barev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 6. 1. 2009, 10. 2. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Index\\_podání\\_barev](http://cs.wikipedia.org/wiki/Index_podání_barev)>
3. LED. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 21. 9. 2005, 4. 3. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>>
4. Teplota. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 5. 5. 2003, 5. 3. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota>>
5. Transmittance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 1. 4. 2008, 27. 2. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Transmittance>>
6. Light-emitting diode. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 1. 8. 2001, 5. 4. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)>
7. OLED. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 4. 3. 2003, 5. 4. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/OLED>>
8. China-led-manufacturer. *Global Manufacture* [online]. Copyright © 2005 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <<http://www.china-led-manufacturer.com/china/led-component-1w-high-power-led.htm>>
9. Seoul Semiconductor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. Florida: Wikimedia Foundation, 12. 11. 2006, 7. 2. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Seoul\\_Semiconductor](http://en.wikipedia.org/wiki/Seoul_Semiconductor)>
10. Oceanoptics. [online]. USA, Copyright 1989 - 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://www.oceanoptics.com/products/usb650.asp>>
11. Ledlightdepot. *Ledlightdepot.co.uk* [online]. 2010 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <<http://www.ledlightdepot.co.uk/high-power-led/151-1w-high-power-led-white-95lm.html>>

12. LED žárovky s výkonovými LED - možnost jak ušetřit (nejenom) elektrickou energii. *FK technics* [online]. 1. 7. 2008[cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/zajimave-vyrobky/art\\_98/led-zarovky-s-vykonovymi-led-moznost-jak-usetrit-nejenom-elektrickou-energii.aspx](http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/zajimave-vyrobky/art_98/led-zarovky-s-vykonovymi-led-moznost-jak-usetrit-nejenom-elektrickou-energii.aspx)>
13. Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku. *Světlo* [online]. 2009, č. 38557 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38557](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38557)>
14. HNILICA, Pavel. *LED žárovky*. In: [online]. Copyright © 2010 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://www.ledkovezarovky.cz/led-zarovky-informace.html>>
15. ŠTÁL, Petr. *Problematika přímé náhrady návěstních žárovek „výkonovými“ svítivými diodami*. In: [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, s 28, článek [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <[http://www.fel.zcu.cz/Data/documents/sem\\_de\\_2008/Stal\\_08.pdf](http://www.fel.zcu.cz/Data/documents/sem_de_2008/Stal_08.pdf)>
16. DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 2. díl: Polovodičové prvky a elektronky*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-161-61.
17. DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 3. díl: Optoelektronika*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
18. KIRKLAND, Kyle. *Light and optics*. New York (USA), Copyright © 2007. ISBN 10: 0-8160-6114-9.

## 7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Bílá výkonová LED - VA charakteristika.

Příloha 2: Bílá výkonová LED - spektrální charakteristiky.

Příloha 3: Bílá výkonová LED - maximální propustnost vzorku.

Příloha 4: Bílá výkonová LED - spektrální charakteristiky ( $I = 100\text{mA}$ ).

Příloha 5: Bílá výkonová LED - spektrální charakteristiky ( $I = 500\text{ mA}$ ).

Příloha 6: Modrá výkonová LED - VA charakteristika.

Příloha 7: Modrá výkonová LED - spektrální charakteristiky.

Příloha 8: Modrá výkonová LED - maximální propustnost vzorku.

Příloha 9: Modrá výkonová LED - spektrální charakteristiky ( $I = 100\text{ mA}$ ).

Příloha 10: Modrá výkonová LED - spektrální charakteristiky ( $I = 500\text{ mA}$ ).

Příloha 11: Bílá výkonová LED - propustnost vzorku.jpg

Příloha 12: Bílá výkonová LED - teplotní expozice ( $I = 100\text{ mA}$ ).jpg

Příloha 13: Bílá výkonová LED - teplotní expozice ( $I = 500\text{ mA}$ ).jpg

Příloha 14: Modrá výkonová LED - propustnost vzorku.jpg

Příloha 15: Modrá výkonová LED - teplotní expozice ( $I = 100\text{ mA}$ ).jpg

Příloha 16: Modrá výkonová LED - teplotní expozice ( $I = 500\text{ mA}$ ).jpg

Příloha 17: Data ze spektrometru - propustnost vzorku.rar

Příloha 18: Data ze spektrometru - teplotní expozice.rar